

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ

В. Ю. Руденков, В. А. Шмелев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель Н. В. Иноземцева

**Актуальность исследования.** В настоящее время в машинах, приборах и всевозможных приводах используются механические зубчатые передачи с различной формой профиля зубьев. Однако наибольшее распространение получили эвольвентные зубчатые передачи.

Эвольвентное зацепление – зубчатое зацепление, в котором профили зубьев очерчены по *эвольвенте окружности*. Эта передача позволяет передавать движение с постоянным *передаточным отношением* и имеет следующие достоинства: простота изготовления колес, достаточно высокая нагрузочная способность, нечувствительность к неточностям межцентрового расстояния. Несмотря на постоянное совершенствование эвольвентных передач, – применение высокопрочных материалов и методов упрочнения, повышенные требования к чистоте поверхности, точности изготовления и сборки, эти передачи не обеспечивают необходимой надежности приводов, отвечающей современным требованиям безопасной эксплуатации технических систем. Обозначенные проблемы объясняются конструктивными особенностями эвольвентных зубчатых передач. В эвольвентных зубчатых передачах коэффициент перекрытия, как правило, не превышает 1,98. При работе зубьев эвольвентного профиля одновременно с перекачиванием происходит проскальзывание, которое, тем больше, чем больше передаточное отношение зубчатой пары. Это приводит к потерям мощности и износу рабочих поверхностей зубьев. Величина передаточного отношения эвольвентных одноступенчатых передач не превышает 6. В силовых передачах в месте контакта возникают значительные контактные напряжения, которые совместно с проскальзыванием зубьев приводят к усталости материала зубчатых колес, интенсивному износу и искажению профиля зуба.

Одним из актуальных вопросов в современных передачах является повышение несущей способности передач при уменьшении их габаритов. Дальнейшим совершенствованием эвольвентных зубчатых передач эту проблему не решить. Нужны новые технические решения: применение альтернативных видов зацепления; обеспечение многопарности зацепления; уменьшение контактных напряжений за счет использования круговых профилей зубьев; замена трения скольжения трением качения; оптимизация компоновки и конструктивных исполнений механических передач.

Целью работы является анализ современных одноступенчатых зубчатых передач с различными профилями зубьев.

**Основная часть.** В данной работе были проанализированы конструкции механических одноступенчатых передач, которые в той или иной мере отвечают предъявленным требованиям и основаны на новых видах зацепления, либо на совершенствовании конструкции известных передач. Были рассмотрены передачи Новикова, передачи с циклоидальным, цевочным и торцевым зацеплением.

В передаче Новикова профиль зубьев выполняется не по эвольвенте, а по дуге окружности или по кривой, близкой к ней [1]. При одинаковых с эвольвентным зацеплением параметрах эта передача обеспечивает увеличение контактной прочности, что, в свою очередь, позволяет повысить нагрузочную способность в 2–3 раза. Взаимодействие зубьев в сравниваемых передачах также различно: в эвольвентном зацеплении преобладает скольжение, а в зацеплении Новикова – качение. Это создает благоприятные условия для увеличения масляного слоя между зубьями, уменьшения потерь на трение и увеличения сопротивления заеданию. Также зацепление Новикова дает возможность применения его во всех видах зубчатых передач: с параллельными, пересекающимися и скрещивающимися осями колес, с внешним и внутренним зацеплением, постоянным и переменным передаточным отношением. Потери на трение в этой системе зацепления примерно в 2 раза меньше потерь в эвольвентном зацеплении, что увеличивает КПД передачи. Однако данная передача имеет следующие недостатки – значительное уменьшение контактной площадки при перекосах зубчатых колес и изменении межосевого расстояния в результате погрешностей изготовления и сборки или упругих деформаций передачи. Передачи Новикова, несмотря на недостатки, благодаря компактности и хорошей приработке зубьев нашли широкое применение при передаче больших постоянных нагрузок, в основном в редукторах больших размеров.

**Циклоидальное зацепление** [2] – зубчатое зацепление, в котором сопряженные профили зубьев выполнены по циклоидальным кривым, характеризуется более высокими по сравнению с эвольвентным зацеплением нагрузочной способностью и износостойкостью зубьев. Однако циклоидальное зацепление чувствительно к изменению межосевого расстояния (погрешностям изготовления, деформациям валов) и сложно в изготовлении. По этим причинам в настоящее время оно применяется редко. Разновидностью циклоидального зацепления является эксцентриково-циклоидальное зацепление, в котором зубья ведущего колеса торцевом сечении представляют собой эксцентрики, а зубья ведомого колеса имеют профиль в виде циклоидальной кривой [2]. При изменении межцентрового расстояния зубчатой пары с эвольвентным профилем зацепление заметно не ухудшается, при циклоидальном зацеплении такое изменение увеличивает трение. Колеса с эвольвентным профилем зуба имеют более прочную ножку, чем колеса с циклоидальным профилем при одном и том же шаге. При работе зубчатых колес трение в месте зацепления зубьев с циклоидальным профилем меньше, чем с эвольвентным, а следовательно, и износ зубьев в первом случае меньше. Циклоидальное зацепление позволяет нарезать колеса с небольшим числом зубьев и получать большие передаточные числа. Упрощенными видами циклоидального зацепления являются часовое и цевочное зацепления.

Особенность часового зацепления состоит в том, что радиусы обеих производящих окружностей принимаются равными половине радиусов соответствующих начальных окружностей. Достоинства часового зацепления: легкий ход; малый износ; возможность реализации больших передаточных отношений в одной ступени. Недостатки часового зацепления: коэффициент перекрытия всегда равен единице; колебание передаточного отношения из-за отклонения профиля ножки зуба от циклоидального; большой мертвый ход из-за значительных боковых зазоров в зацеплении, что делает невозможным применение часового зацепления в реверсивных передачах.

**Цевочное зацепление** – зубчатое зацепление посредством цилиндрических круговых элементов (цевок и зубьев с сопряженным профилем). Это зацепление применяется в передачах с малой разницей чисел зубьев. Оно характеризуется плавностью хода и низким уровнем шума по сравнению с эвольвентным зацеплением; имеет высокий ресурс и надежность; меньшие габариты при одинаковом передаваемом крутящем моменте в сравнении с эвольвентным зацеплением; передаточное отношение от 6 до 190; обладает высокой кинематической точностью. Недостатками цевочного зацепления являются: чувствительность к изменению межосевого расстояния; высокая стоимость; высокие требования к точности изготовления; сложность формы зуба исходного контура зуборезного инструмента при методе обката.

Также были рассмотрены наиболее распространенные на сегодняшний день виды торцевых передач: передача Нечаева и торцевое цевочное зацепление. Конструктивная схема передачи Нечаева представляет собой два зубчатых колеса, сцепленные между собой торцевыми зубьями. Данная зубчатая передача способна работать в таких условиях, в которых работа эвольвентных передач невозможна [3]. Зубья ведомого зубчатого колеса выполнены с плоскими рабочими поверхностями, а ведущей шестерни – с выпуклыми рабочими поверхностями, ограниченными кривыми семейства «улиток Паскаля». Благодаря особой форме данной кривой, коэффициент перекрытия в таком зацеплении увеличен до двух, что придает высокую плавность и малую шумность. В этой передаче – малое число зубьев шестерни, что позволяет увеличить передаточное отношение одной ступени в 4 раза. При одинаковых размерах модуль по сравнению с эвольвентной передачей может быть увеличен в 2–2,5 раза, что в 3–4 раза снижает изгибные напряжения. Использование выпуклой и плоской рабочих поверхностей в качестве сопряженных позволяет снизить контактные напряжения. Внутреннее зацепление, а также контакт плоской поверхности зубьев ведомого колеса и выпуклой поверхности зубьев шестерни с увеличенным коэффициентом перекрытия дает возможность уменьшить габариты и металлоемкость передачи. Недостатки: сложное профилирование малых зубчатых колес (шестерен) по сравнению с эвольвентными колесами; индивидуальное изготовление шестерни, т. е. изготовление новых инструментов и оснасток; затрудненное восстановление изношенных рабочих поверхностей и низкий уровень ремонтпригодности.

Торцевая цевочная передача [4] предназначена для работы в открытых приводах и агрессивных средах, так как в месте контакта зубьев реализуется трение качения, что значительно уменьшает износ. Использование в качестве линии зацепления части внутренней петли «улитки Паскаля» обеспечивает при круглом профиле зуба шестерни плоский профиль зуба колеса, что позволяет упростить технологический процесс и изготавливать детали передачи на универсальном металлорежущем оборудовании с помощью унифицированной оснастки и инструмента. Использование выпуклой и плоской рабочих поверхностей в качестве сопряженных позволяет снизить контактные напряжения. Наиболее широко торцевые передачи используются в ротационных механизмах.

**Заключение.** Анализ зубчатых передач с различным профилем зубьев, обзор их преимуществ и недостатков позволяет обосновать выбор конкретного типа зубчатой передачи для решения той или иной научной и инженерной задачи на стадии проектировочных расчетов. Также было выявлено, что торцевая зубчатая передача может воспринимать нагрузки более значительные, чем другие зубчатые передачи при тех же габаритных размерах, и способна работать в абразивной среде без заклинивания.

## Л и т е р а т у р а

1. Короткин, В. И. Сравнение зубчатых передач Новикова и эвольвентных передач / В. И. Короткий // Вестн. машиностроения. – 2009. – № 1. – С. 3–8.
2. Леонтьев, М. Ю. Обзор достоинств и недостатков эксцентриково-циклоидального зацепления / М. Ю. Леонтьев, В. А. Раевский, А. Е. Смоловик // Актуальные проблемы гуманитар. и естеств. наук. – 2016. – № 5. – С. 54–57.
3. Тупицын, А. А. Торцевая зубчатая передача с внутренним цевочным зацеплением / А. А. Тупицын, В. В. Нечаев, В. Е. Гозбенко // Современ. технологии. Математика. Механика и машиностроение. – 2014. – № 3. – С. 25–29.
4. Торцовая цевочная передача : пат. 84488 Рос. Федерация : МПК7 F 16 Н 1/32, F 16 Н 25/06 / А. А. Тупицын, К С. Каргапольцев, А. А. Тупицын ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщения. – № 2008146315/22 ; заявл. 24.11.2008 ; опубл.10.07.2009 // Бюл. № 13. – 1 с.