

УДК 621.833.6.001.57
КОНИЧЕСКИЕ ТЯГОВЫЕ РЕДУКТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА
ОСНОВЕ ЭКСЦЕНТРИКОВО-ЦИКЛОИДАЛЬНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

В. В. СТАНОВСКОЙ, С. М. КАЗАКЯВИЧЮС, Т.А. РЕМНЕВА,
В. М. КУЗНЕЦОВ

Закрытое акционерное общество
«ТЕХНОЛОГИЯ МАРКЕТ»
Томск, Россия

Повышение надёжности локомотивов, обеспечивающих безотказность движения поездов, становится одной из актуальных задач, стоящих перед железнодорожным транспортом. «Безопасность движения поездов определяется, в основном, состоянием механического оборудования. Согласно статистике, его неисправности служат причиной 40–50 процентов всех отказов. Из них на долю неисправностей тяговых редукторов приходится примерно треть» [1]. Тяговые редукторы работают при очень больших динамических нагрузках. Поэтому повышение надёжности локомотивов зависит от соответствующего повышения надёжности передаточного механизма. Применяемые сегодня в железнодорожном транспорте конические тяговые редукторы обеспечивают необходимое передаточное отношение (6–12) только в двухступенчатой схеме.

Эксцентрикovo-циклоидальное (ЭЦ) зацепление [2] представляет собой зацепление колес, меньшее из которых имеет один или несколько криволинейных зубьев, профили которых в торцовых сечениях очерчены дугами эксцентрично смещенных окружностей, а зубья большего колеса в тех же сечениях очерчены участками циклоидальных кривых. Отсюда и название – ЭЦ зацепление, или в английском варианте ExCyGear.

Как показано в работах [3, 4], зацепление ExCyGear обеспечивает в одной ступени редуктора достаточно широкий диапазон передаточных отношений, имеет высокую нагрузочную способность при минимальной величине относительной массы, и мало чувствительно к несоосности колес, поэтому может успешно конкурировать не только с традиционным эвольвентным зацеплением, но и с зацеплением Новикова, а также с зацеплением с помощью промежуточных тел качения. Эти качества зацепления делают его очень привлекательным для проектирования тяжело нагруженных редукторов, таких как тяговые редукторы колесного транспорта.

Для проверки возможности и перспектив использования зацепления ExCyGear в тяговых редукторах железнодорожного транспорта были рассчитаны и спроектированы ЭЦ колеса тягового редуктора маневрового локомотива МПТ6 (изделие 1), а также мотор-редуктора для подземного электровоза КА-25 (изделие 2).

Редуктор локомотива МПТ6 (изделие 1) располагается непосредственно на колесной оси и должен обеспечивать передаточное отношение 6, выходной момент (240-5110) Нм при оборотах входного вала (от 0 до 2470) об/мин. Кроме того, поставлена задача заменить два последовательных редуктора на один, причем разместить его в существующем корпусе. Корпус ограничивает размер зубчатого колеса величиной 530 мм. Этим требованиям удовлетворяет только передача с ExSyGear зацеплением конических колес, основные детали которой показаны на рис. 1.

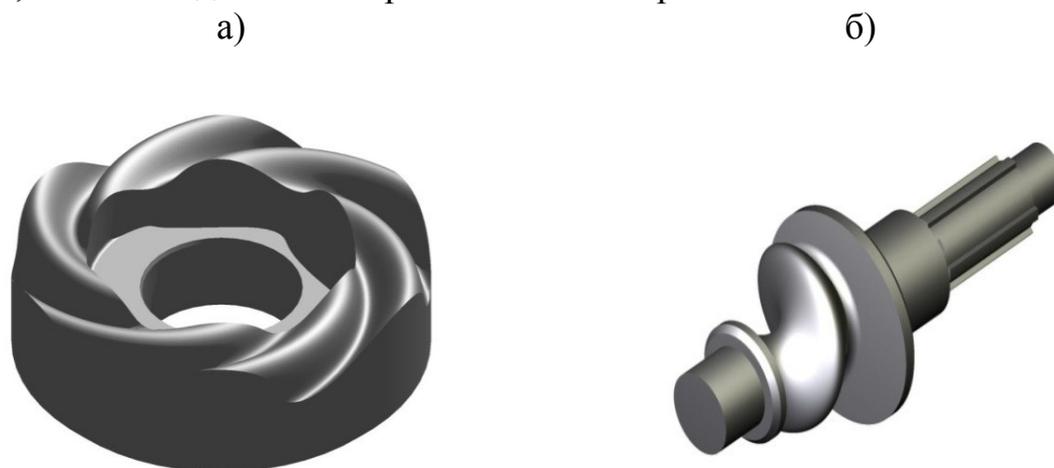


Рис. 1. Детали передачи с ЭЦ-зацеплением: а – ведомый элемент; б – ведущий элемент

Технические параметры мотор-редуктора (изделие 2): мощность 90 кВт, передаточное отношение редуктора – 12. Диаметр выходного зубчатого колеса редуктора (630 мм) ограничен размерами ж/д колеса и минимальным расстоянием от редуктора до ж/д полотна. Мотор-редуктор является неподдресоренным звеном и вес его должен быть минимальным.

Обеспечить требуемые параметры при минимальных размерах и массе редуктора способно только ExSyGear зацепление конических колес.

Расчет геометрии зацепления ExSyGear производился с помощью математического аппарата, описанного в работе [5]. Создана рабочая программа, рассчитывающая КПД и величины контактных напряжений для различных значений R , d , e , L , z , где R определяет размер большего колеса, z – число зубьев, L – шаг зацепления, а d и e определяют размеры и форму винтового конического эксцентрика.

Расчеты показали, что зацепление с однозубым винтовым эксцентриком имеет КПД около 85 %, что недостаточно для тяговых редукторов. Более высокий КПД имеет зацепление с шестерней с более чем одним зубом [6]. Ниже приведены расчетные параметры зубчатого зацепления для этого

случая, где n – количество заходов винтового эксцентрика (или его число зубьев).

Табл. 1. Расчетные параметры зубчатого зацепления

№ изделия	Re (мм)	D (мм)	e (мм)	L (мм)	n	z	КПД
1	267,5	31	21,04	85	5	30	0,999
2	300	29,46	11	55	3	36	0,994

Кроме того, было показано, что в реальном зацеплении область контакта зубьев всегда лежит в достаточно узкой полосе на участке фронта циклоидальной кривой и соответствующих им участках дуг окружности. Это значит, что вершины и впадины циклоиды, а также соответствующие участки винтового эксцентрика могут иметь любую непересекающуюся форму [7]. С учетом этого были спроектированы и изготовлены уменьшенные в 3 раза макеты конических редукторов в открытом корпусе.



Рис. 2. Макеты конических редукторов с ExSyGear зацеплением

Открытость зацепления позволяет визуально оценить положение точки контакта в зацеплении, наличие проскальзывания между колесом и шестерней и т.п. Оба макета одинаково хорошо работают как в режиме редуктора, так и в режиме мультипликатора, что свидетельствует о малых потерях, а, следовательно, о высоком КПД всего редуктора.

Опытный образец тягового редуктора (изделие 1), установленного на колёсной паре, представлен на рис. 3, а детали опытного образца изделия 2 показаны на рис. 4.

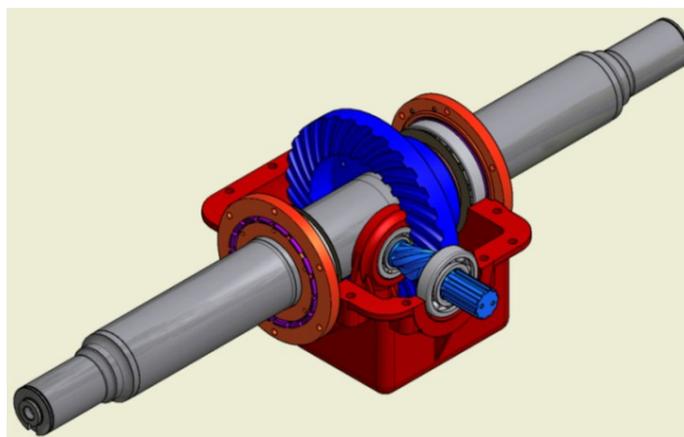


Рис. 3. Колёсный редуктор с ExSyGear зацеплением для локомотива МПТ6 (изделие 1)



Рис. 4. Детали конического редуктора с ExSyGear зацеплением для подземного электровоза (изделие 2)

Для нарезания зубьев на обрабатываемом центре использовались твёрдосплавные сферические фрезы. Материал заготовок – нормализованная сталь 12ХН3А. После нарезания зубьев детали подвергаются поверхностной термообработке (цементации) до достижения твёрдости 58...62 HRC.

Опытные образцы изделия 1 прошли испытания на стенде в составе колесной пары на Тихорецком машиностроительном заводе, а затем они были установлены непосредственно на тяговый мотовоз МПТ6 (ТМЭ№001) для проведения силовых (тяговых) испытаний в режиме пробуксовки колес. Величина тягового усилия, и максимальная скорость движения машины полностью соответствуют требованиям технического задания. Не выявлен повышенный шум в работе трансмиссии.

После испытаний редуктор был разобран для контроля положения пятна контакта в зацеплении. Как видно из рис. 5 длина пятна контакта составляет около 95 % от длины зуба. По высоте зуба пятно контакта не выходит на кромку зуба, располагаясь в полюсе зацепления, что определяет минимальные потери в редукторе.

Мотор-редуктор (изделие 2) был подвергнут испытаниям на стенде с нагрузочным колесом. Измерялись КПД, шум и температура корпуса редуктора во всём диапазоне нагрузок. Средний КПД редуктора, полученный на стенде, составляет 97,5 %, а с учётом потерь в стенде – КПД редуктора приближается к расчетному значению. Температура корпуса мотор-редуктора поднялась чуть выше 60 градусов. Шумовые характеристики колебались в диапазоне 65 ДБа, что приемлемо для опытного образца.



Рис. 5. Положение пятна контакта в ExSyGear зацеплении

Испытать опытный образец на перегрузку до слома зубьев не удалось, т.к. при повышении момента остановился двигатель. Это свидетельствует о большом запасе прочности в зубчатом зацеплении. После проведения испытаний мотор-редуктор был разобран. Видимого износа на контактирующих поверхностях не обнаружено.

Таким образом, на примере тяговых редукторов для железнодорожных локомотивов показано, что использование зацепления ExSyGear позволит значительно уменьшить габариты и массу редукторов при увеличении их ресурса.

По данной методике изготовлены опытные образцы колес для главной передачи автомобиля БелАЗ, которые сейчас переданы заказчику для проведения ресурсных испытаний.

Настоящая работа выполнена в рамках госконтракта с «Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по программе «Антикризис».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Высокое качество во имя безопасности](#) // «Евразия Вести» Международное информационно-аналитическое обозрение. – № 11.– 2005. – с. 14.
2. Новый вид зацепления колес с криволинейными зубьями / В. В. Становской [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. – № 9. – 2008. – С. 34–40.
3. Эксцентриково-циклоидальное зацепление зубчатых колес и механизмы на его основе / В. В. Становской [и др.] // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения: сб. докл. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Ижевск, 2008. – С. 148–152.
4. Расчет циклоидально эксцентрикового зацепления и механизмов на его основе. / В. В. Становской [и др.] // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения: сб. докл. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Ижевск, 2008. – С.153–156.
5. **Щербаков, Н. Р.** Математическое и компьютерное моделирование динамического состояния систем передачи движением : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Томск : 2009. – 30 с.
6. **Пат. 2416748 RU, МКИ⁸ F 16 H 55/08; F 16 H 1/08.** Эксцентриково-циклоидальное зацепление зубчатых профилей с криволинейными зубьями / В. В. Становской, С. М. Казакиявичюс, Ремнева Т.А. и др.; заявитель и патентообладатель В. В. Становской. –№ 2010103286/11; заявл. 01.02.2010; опубл. 20.04.2011, Бюл. № 11.
7. Работоспособность эксцентриково-циклоидального (ЭЦ) зацепления при изменениях межосевого расстояния колес. Модификация вершин и впадин зубьев / С. М. Казакиявичюс [и др.] // Вестник машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 7–9.