

УДК 621.833.6

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е.А. Берлова

Рассмотрены сравнительные характеристики российских и зарубежных планетарных редукторов. Выявлены причины низкой нагрузочной способности отечественных редукторов, показаны методы повышения нагрузочной способности и долговечности.

**Ключевые слова:** редуктор, нагрузки, точность, сателлит, эпицикл, напряжения, крутящий момент.

### Введение

Планетарные редукторы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Однако редукторы отечественного производства обладают меньшими нагрузочными способностями и долговечностью, чем зарубежные аналоги. Ниже показаны пути повышения характеристик планетарных редукторов.

Основным достоинством планетарных передач является многопоточность передачи энергии. По этой причине планетарные передачи обладают меньшими габаритами и массой, чем редукторы простого ряда, при одинаковых нагрузках и долговечности. Многие широко распространенные схемы планетарных редукторов обеспечивают большие передаточные отношения при высоких значениях КПД [1]. Кинематическая схема планетарного редуктора приведена на рис. 1.

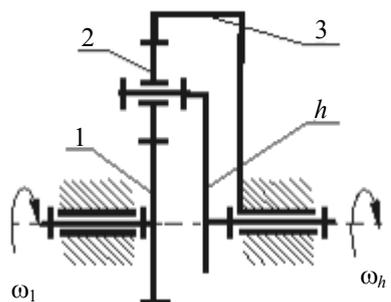


Рис. 1. Кинематическая схема планетарного редуктора: 1 – шестерня; 2 – сателлит; 3 – эпицикл;  $h$  – водило

### Обзор состояния производства планетарных редукторов

Требования потребителей к редукторам обуславливают появление на рынке большого разнообразия различных типов и серий планетарных редукторов.

Фирмы-производители таких редукторов, как Flender и Hyosung выпускают, в основном, крупногабаритные редукторы с мощностью 15–75000 кВт и номинальным крутящим моментом 5300–32500000 Н·м [2, 3]. Фирма Bonfiglioli выпускает широкий диапазон планетарных редукторов множества типоразмеров с моментом на выходе 1000–500000 Н·м [4]; редукторы Alpha серии SP отличаются высокой точностью передачи движения [5]. Также широко распространены редукторы таких фирм, как Sumitomo, Brevini.

Российская промышленность выпускает серии планетарных редукторов, такие как 1МП, МРв, МПз, МПО и т.п. [6]. К сожалению, большинство редукторов было разработано десятилетия назад, имеет устаревшую конструкцию. Последней разработкой отечественной промышленности являются редукторы серии ЗМП. В серии представлены редукторы с радиусами расположения осей сателлитов 25–160 мм с номинальным крутящим моментом 75–16000 Н·м [7, 8]. При этом ряды типоразмеров российских редукторов гораздо реже, чем у иностранных аналогов.

На российских предприятиях (например, НТЦ «Редуктор») в данное время производится модернизация планетарных редукторов. Однако нагрузочная способность модернизированных редукторов невелика и превышает отечественные аналоги на 10–20%; отличия в конструкции незначительны.

Автором проведен анализ и сравнение технических характеристик зарубежных и отечественных редукторов. На рис. 2 приведена сравнительная характеристика зависимостей номинальных крутящих моментов на тихоходном валу от радиуса расположения осей сателлитов для зарубежных и отечественных планетарных редукторов.

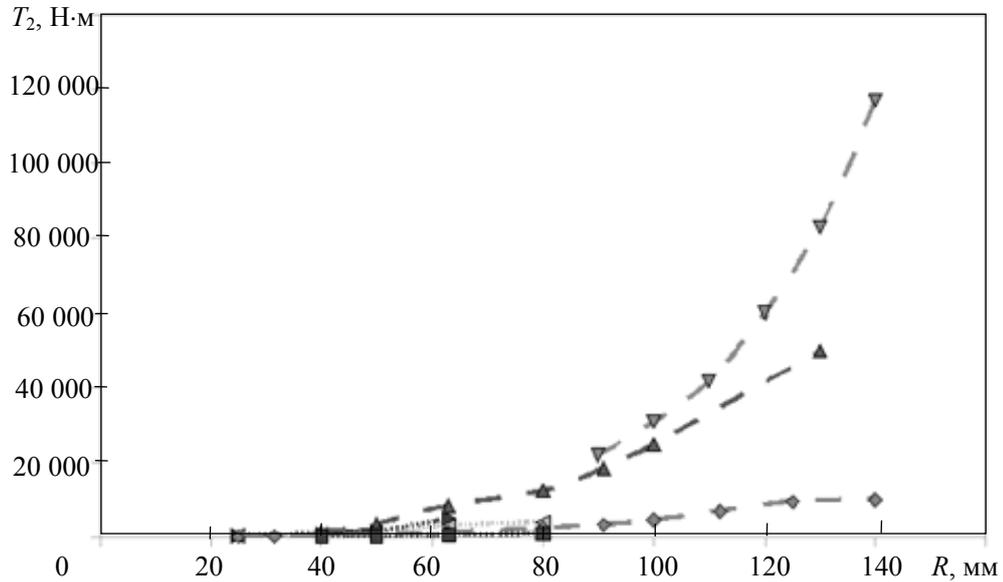


Рис. 2. Номинальный крутящий момент редукторов ( $T_2$ ) в зависимости от радиуса водила (радиуса расположения осей сателлитов):

■ 1МП    ◆ 3МП    ▼ Flender    ▲ Bonfiglioli    ▴ Alpha    ◁ Sumitomo    ◆ Brevini

На рис. 3 приведены графики сравнения крутящего момента редукторов на единицу массы.

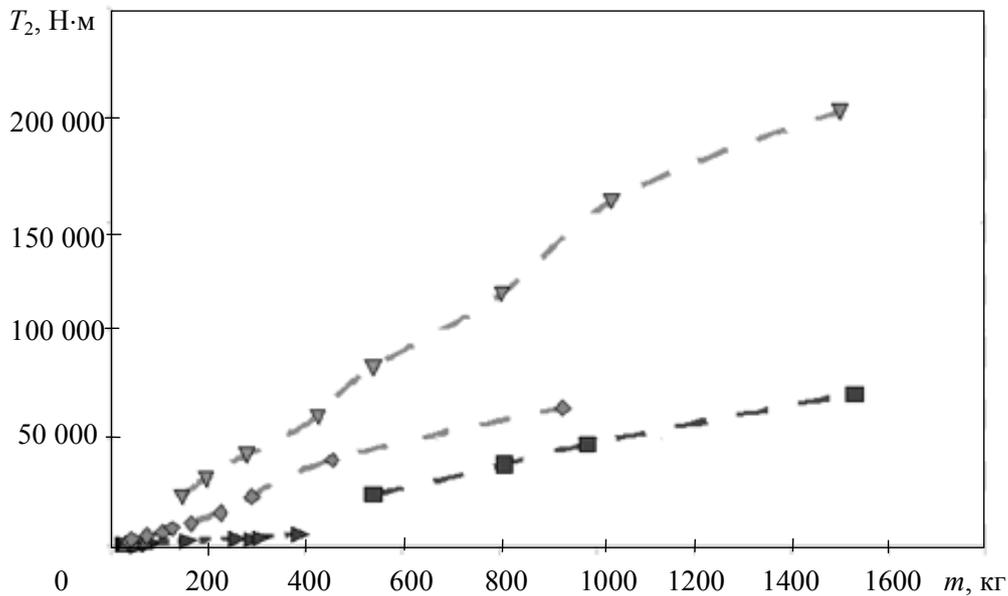


Рис. 3. Номинальный крутящий момент редукторов ( $T_2$ ) в зависимости от массы:

■ Hyosung    ◆ Bonfiglioli    ▼ Flender    ▲ Alpha    ◆ 3МП

Из рассмотрения графиков, приведенных на рис. 2, 3, можно сделать выводы, что нагрузочная способность российских редукторов в несколько раз ниже зарубежных.

Методы повышения нагрузочной способности и долговечности

Для увеличения нагрузочной способности и долговечности редукторов можно использовать следующие методы [1]:

1. обеспечение равнопрочности зацепления центрального колеса – сателлита и сателлита – эпицикла, что достигается заменой материала эпицикла;
2. применение косозубого, шевронного или арочного зацепления;
3. повышение точности производства как зубчатых колес, так и других элементов редуктора;
4. использование безопорного водила (в целях повышения одновременности работы сателлитов);
5. уточнение методов расчета планетарных редукторов, в частности, решение статически неопределимой задачи в зацеплении при количестве сателлитов больше трех;
6. введение в расчет упругой динамической модели с распределенными параметрами;
7. использование более сложных динамических моделей, в частности, применение метода конечных элементов для моделей с распределенными параметрами, в целях обеспечения одновременной работы сателлитов.

Применение методов 1 и 2 обуславливается решением задачи обработки внутреннего зуба на эпицикле (прямого, косоого, арочного, шевронного) при высокой твердости материала эпицикла (около 60 HRCэ). Такая возможность появилась в новых конструкциях станков, обеспечивающих обработку внутреннего косозубого зацепления после цементации с закалкой. Эффективность этих методов показана ниже.

Повышение точности производства зубчатых колес (метод 3) упирается в такие проблемы, как устарелость и отсталость нормативно-технической документации, в частности, ГОСТ 1643-81 [9], игнорирование требований последних рекомендаций ISO 1328 [8] и др. Одновременно отечественное производство сталкивается с устаревшим станочным парком и низкой квалификацией рабочих. Совокупность этих проблем не позволяет надеяться на быстрое преодоление разрыва в точности изготовления отечественных и зарубежных планетарных редукторов.

Реализация методов 4–7 связана с совершенствованием расчета планетарных передач. Метод увеличения нагрузочной способности при использовании косозубого зацепления взамен прямозубого хорошо известен, однако его применение требует коренной переработки всего узла сателлита. Это связано с изменением конструкции подшипника, а, следовательно, и осей сателлитов. В зарубежных редукторах для нейтрализации осевого усилия в зацеплении используются сдвоенные сателлиты.

Обобщая сказанное, можно сделать вывод, что увеличение нагрузочной способности возможно лишь при кардинальном изменении всей конструкции планетарного редуктора.

Результаты расчетов

Исследованы два двухступенчатых планетарных редуктора: с радиусом водила 31,5 мм и крупногабаритный редуктор с радиусом водила 125 мм. Для расчетов использованы следующие исходные данные. Шестерня: материал – сталь 12ХНЗА; термохимическая обработка – цементация, закалка; финишная обработка – шлифование; твердость активных поверхностей зубьев – 58–61 HRCэ; степень точности – 6 по [9]. Сателлит: материал – сталь 12ХНЗА; термохимическая обработка – цементация, закалка; финишная обработка – шлифование; твердость активных поверхностей зубьев – 58–61 HRCэ; степень точности – 6 по [9]. Эпицикл: материал – сталь 40Х; термоулучшение; твердость активных поверхностей зубьев – 248–293 НВ; степень точности – 8 по [9].

Параметры редукторов приведены в табл. 1.

			Число зубьев	Модуль, мм	Коэффициент смещения	Ширина зубчатого венца, мм	Номинальный крутящий момент, Н·м
ЗМП-31,5	Быстроходная ступень	Шестерня	25	1,25	0,4	20	124
		Сателлит	26		0	14	
		Эпицикл	77		0	8	
	Тихоходная ступень	Шестерня	13	1,25	0,4	28	
		Сателлит	38		0	25	
		Эпицикл	89		0	18	
ЗМП-125	Быстроходная ступень	Шестерня	14	3	0,45	37	5000
		Сателлит	53		0,077	34	
		Эпицикл	121		0,077	35	
	Тихоходная ступень	Шестерня	23	5	0,1	77	
		Сателлит	28		- 0,1	75	
		Эпицикл	79		- 0,1	77	

Таблица 1. Геометрические параметры редукторов

Рассмотрим случай замены материала и способа термообработки эпицикла. Расчеты производились по методикам В.Н. Кудрявцева [1]. Все полученные в результате расчеты приведены в табл. 2, 3. Как видно из результатов расчетов, замена материала эпицикла увеличивает допускаемые контактные напряжения и напряжения изгиба, в связи с этим увеличивается запас прочности в зацеплении сателлит–эпицикл.

	Быстроходная ступень				Тихоходная ступень			
	Расчетное	Допускаемое	Расчетное (замена материала эпицикла)	Допускаемое (замена материала эпицикла)	Расчетное	Допускаемое	Расчетное (замена материала эпицикла)	Допускаемое (замена материала эпицикла)
Контактные напряжения, МПа								
Сателлит-эпицикл	920	640	1092	1288	809	640	888	1288
Напряжения изгиба, МПа								
Сателлит	565	820	565	820	809	820	809	820
Эпицикл	419	498	483	820	636	498	734	820

Таблица 2. Редуктор ЗМП-31,5; зацепление сателлит–эпицикл

	Быстроходная ступень				Тихоходная ступень			
	Расчетное	Допускаемое	Расчетное (замена материала эпицикла)	Допускаемое (замена материала эпицикла)	Расчетное	Допускаемое	Расчетное (замена материала эпицикла)	Допускаемое (замена материала эпицикла)
Контактные напряжения, МПа								
Сателлит-эпицикл	420	640	443	1288	988	640	1127	1288
Напряжения изгиба, МПа								
Сателлит	248	820	248	820	582	820	582	820
Эпицикл	173	498	200	820	416	490	480	820

Таблица 3. Редуктор ЗМП-125; зацепление сателлит–эпицикл

	Быстроходная ступень					Тихоходная ступень				
	Расчетное $\beta=0^\circ$	Расчетное $\beta=6^\circ$	Расчетное $\beta=14^\circ$	Расчетное $\beta=21^\circ$	Допускаемое	Расчетное $\beta=0^\circ$	Расчетное $\beta=6^\circ$	Расчетное $\beta=14^\circ$	Расчетное $\beta=21^\circ$	Допускаемое
Контактные напряжения, МПа										
Сателлит-эпицикл	1092	1084	1013	943	1288	888	858	806	771	1288
Напряжения изгиба, МПа										
Сателлит	565	477	431	389	820	809	760	561	512	820
Эпицикл	483	465	421	382	820	734	706	524	484	820

Таблица 4. Редуктор ЗМП-31,5; зацепление сателлит–эпицикл

	Быстроходная ступень					Тихоходная ступень				
	Расчетное $\beta=0^\circ$	Расчетное $\beta=6^\circ$	Расчетное $\beta=14^\circ$	Расчетное $\beta=21^\circ$	Допускаемое	Расчетное $\beta=0^\circ$	Расчетное $\beta=6^\circ$	Расчетное $\beta=14^\circ$	Расчетное $\beta=21^\circ$	Допускаемое
Контактные напряжения, МПа										
Сателлит-эпицикл	443	408	368	348	1288	1127	1082	1062	1005	1288
Напряжения изгиба, МПа										
Сателлит	248	202	184	139	820	582	546	374	343	820
Эпицикл	200	163	149	113	820	480	450	345	315	820

Таблица 5. Редуктор ЗМП-125; зацепление сателлит–эпицикл

Результаты расчетов планетарных редукторов с косозубым зацеплением приведены в табл. 4 и 5. Изменяемым параметром выбран угол наклона зубьев  $\beta=0-21^\circ$ .

Таким образом, изменение угла наклона зубьев приводит как к уменьшению напряжений изгиба, так и контакта.

#### Заключение

Приведенные расчеты планетарных редукторов подтверждают, что изменение материала эпицикла и способа его обработки, а также применение косозубого зацепления приводят к увеличению нагрузочной способности и долговечности планетарных редукторов. Это, в свою очередь, позволяет увеличить номинальный крутящий момент на выходном валу редукторов до уровня зарубежных аналогов.

#### Литература

1. Планетарные передачи. Справочник / Под ред. В.Н. Кудрявцева, Ю.Н. Кирдяшева. – Л.: Машиностроение, 1977. – 536 с.
2. Каталог Planetary gear units. Planurex2 продукции фирмы Flender Service GmbH, 2009. – 48 с.
3. Каталог HyoSung Planetary Gear Reducer продукции фирмы HyoSung фирмы HyoSung Diamond Industrial Co., Ltd., 2009. – 12 с.
4. Каталог Transmittal Bonfiglioli. Serie 300 продукции фирмы BONFIGLIOLI RIDUTTORI S.p.A., 2008. – 188 с.
5. Каталог Alpha SP+ продукции фирмы Wittenstein (alpha), 2006. – 96 с.
6. Анфимов М.И. Редукторы. Конструкции и расчет. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1993. – 463 с.
7. Каталог продукции фирмы НТЦ «Редуктор», 2004.
8. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Анализ конкурентоспособности отечественного редукторостроения в части точности зубчатых колес и передач // Научно-технический вестник СПб ГУИТМО. – 2006. – № 31. – С. 259–266.
9. ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – Введ. 01.07.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 45 с.

**Берлова Елена Александровна**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, berlova\_@mail.ru