

УДК 621.833.002:621.83.06(043.3)

## ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ САТЕЛЛИТА ПЛАНЕТАРНОЙ ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УПРОЩЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

*д-р техн. наук, проф. П.Н. ГРОМЫКО,  
канд. техн. наук, проф. А.А. ЖОЛОБОВ, Л.Г. ДОКОНОВ  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)*

*Основной причиной, сдерживающей широкое применение прецессионных редукторов в промышленности и сельском хозяйстве, является использование сложных технологий для изготовления пространственно-модифицированных зубьев сателлита. Статья посвящена разработке так называемых упрощенных способов обработки зубьев сателлита прецессионного редуктора на основе использования традиционных методов зубообработки, упрощающих процесс их формообразования. Решение поставленных задач позволит на базе планетарной прецессионной передачи разрабатывать и изготавливать компактные, малогабаритные, имеющие низкую себестоимость изготовления редукторы с возможностью обработки деталей на универсальном оборудовании, что сделает их конкурентоспособными и позволит решить важную для Республики Беларусь проблему импортозамещения редукторной техники.*

Анализируя технико-экономические характеристики мотор-редукторов, выпускаемых известными мировыми фирмами-производителями, было определено, что основной причиной, сдерживающей серийное производство различных типов редукторной техники в Республике Беларусь, является техническая сложность данных изделий. Попытки их серийного изготовления без использования специальных высоких технологий приводят к низкому техническому уровню или к высокой отпускной цене.

Разработка новых структурных вариантов механических передач, обеспечивающих разрабатываемым редукторам конструктивные и технологические преимущества перед существующими и серийно выпускаемыми аналогами, является основным направлением совершенствования редуцирующей техники.

Для освоения серийного производства редукторов, изготовленных на основе деталей с приемлемой для обычного производства точностью изготовления, но в тоже время имеющих технический уровень, соответствующий уровню лучших мировых аналогов, необходимо чтобы создаваемые редукторы сочетали в себе одновременно редуцирующие функции и функции компенсирующей муфты.

На основе исследований, проведенных специалистами лаборатории по прецессионным передачам Белорусско-Российского университета, было установлено, что указанным выше сочетанием функций, благодаря особенностям структуры, обладают планетарные прецессионные передачи (ППП) (рис. 1) [1].

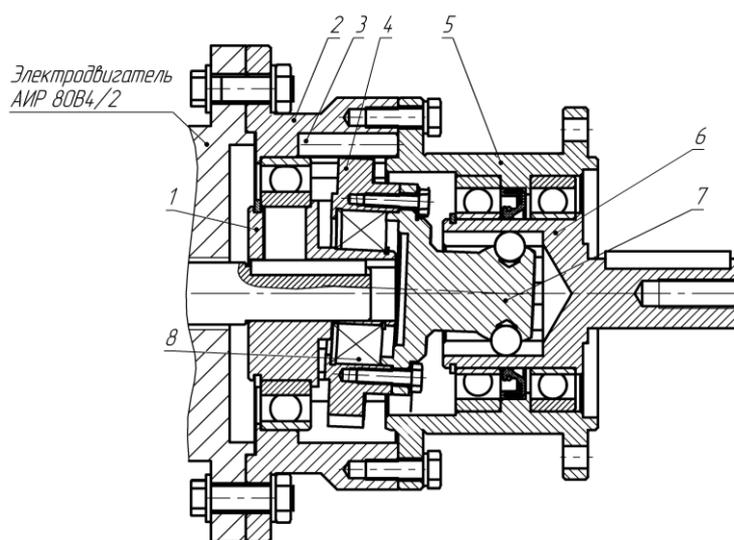


Рис. 1. Общий вид конструкции прецессионного мотор-редуктора:  
1 – эксцентрик; 2 – корпус с неподвижным центральным колесом;  
3, 4 – сателлит; 5 – корпус; 6 – вал выходной; 7 – хвостовик

Обзор различных конструкций и функциональных возможностей планетарных прецессионных передач, опыт проектирования, изготовления и испытаний работы прецессионных передач различных типов позволили сделать вывод, что основным фактором, сдерживающим широкое применение ППП, являются технологические трудности, связанные с процессом изготовления бочкообразных зубьев сателлита.

Анализ различных способов изготовления пространственно-модифицированных зубьев позволил определиться с направлением совершенствования процесса их формообразования – это использование упрощенных профилей зубьев сателлита, полученных традиционными методами зубообработки стандартным режущим инструментом.

Для исследований были предложены четыре способа формообразования зубьев сателлита, на основе которых возможно их изготовление традиционными методами зубообработки стандартным зуборезным инструментом, не используя сложных специальных приспособлений.

Необходимость разработки нескольких способов изготовления обосновывается способностью каждого из способов удовлетворять специфическим требованиям типа производства и необходимому уровню качества выходных показателей проектируемых редукторов.

Первым шагом разработки способов формообразования упрощенных зубьев сателлита явилось создания методик для определения теоретически точных и упрощенных поверхностей зубьев на основе создания компьютерных моделей зубьев трапецеидальной формы [1].

Исследования формы теоретически точных и упрощенных зубьев сателлита методами компьютерного моделирования позволили установить, что с ростом угла  $\alpha$  наклона профиля зуба центрального колеса, а также с увеличением расстояния  $l_2$  от точки прецессии до ближайшего торцевого сечения сателлита профиль теоретически точной модели зуба сателлита приближается к профилю зубьев центрального колеса. Приближения профиля зубьев центрального колеса к профилю зубьев сателлита является одним из необходимых условий возможности обработки зубьев сателлита предложенными упрощенными способами их формообразования (рис. 2).

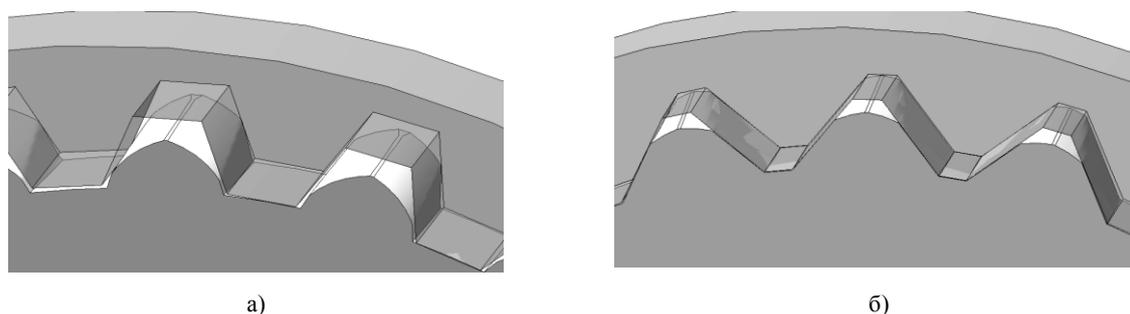


Рис. 2. Совмещение моделей теоретически точных зубьев сателлита с моделями трапецеидальных зубьев формообразующего центрального колеса при разных углах наклона профиля зубьев центрального колеса  $\alpha$ : а – при  $\alpha = 20^\circ$ ; б – при  $\alpha = 40^\circ$

По результатам исследований теоретически точных профилей разработаны методика расчета и программное обеспечение, реализующее указанную методику, позволившие определить высоту профиля зубьев сателлита, на которой гарантировано совпадение профилей зубьев центрального формообразующего колеса и профилей зубьев сателлита, следовательно, не происходит срезание тела зуба сателлита в процессе его формообразования.

В основе первого способа формообразования зубьев сателлита лежит использование в зацеплении ППП корригированных эвольвентных зубчатых колес, изготовленных на традиционном зуборезном оборудовании. Методика расчета, а точнее, подбора геометрии адаптированных эвольвентных зубьев сателлита основана на применении известных формул теории эвольвентного зацепления [2].

Сущность второго способа формообразования зубьев сателлита, названного методом двойного рабочего хода инструмента, заключается в следующем. В процессе обработки червячной фрезой и заготовке зубчатого изделия сообщают взаимосвязанные вращения вокруг их осей, обеспечивающие нарезание зубьев методом обкатки. Причем обработку производят, настроив червячный инструмент на нарезание косых зубьев с углом наклона, обеспечивающим необходимое заострение бочкообразных зубьев. Затем осуществляют перенастройку зуборезного оборудования на нарезание косых зубьев с тем же значением угла, но с противоположным направлением наклона зубьев [3].

Третий способ формообразования зубьев сателлита носит название метода конического зубофрезерования. Схема процесса формообразования зубьев сателлита третьим методом показана на рисунке 3.

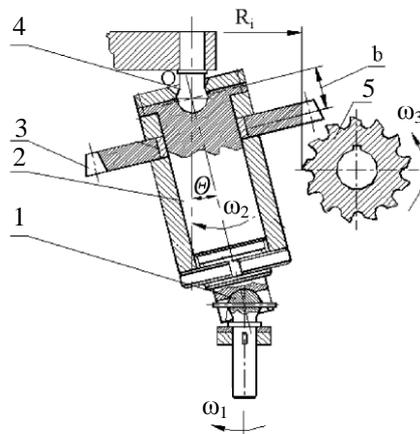


Рис. 3. Схема формообразования упрощенных зубьев сателлита, полученных путем наклона оси вращения заготовки сателлита к оси центрального колеса:  
1 – сферический шарнир; 2 – оправка; 3 – заготовка сателлита;  
4 – сферический шарнир; 5 – зуборежущий инструмент

Четвертый способ формообразования зубьев сателлита основан на применении в структуре ППП конических роликов для образования зубчатого венца центрального колеса, а зубья сателлита представляют собой зубья звездочки цепной передачи (рис. 4). При данном способе зубья сателлита могут быть получены таким же высокопроизводительным методом, как и профиль звездочки цепной передачи, что делает возможным их изготовление на обычном зубофрезерном станке червячной фрезой с круговым профилем зубьев [4].

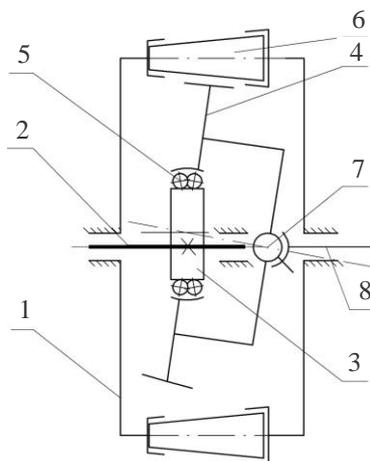


Рис. 4. Структурная схема ППП с зубьями сателлита, имеющими профиль зубьев звездочки цепной передачи:  
1 – корпус; 2 – входной вал; 3 – эксцентриковая втулка; 4 – сателлит;  
5 – сферический подшипник; 6 – конические ролики; 7 – угловая муфта; 8 – выходной вал

Для установления соответствия геометрических параметров упрощенных зубьев сателлита, полученных различными методами формообразования с теоретически точными зубьями, была использована программа САПР SolidWorks, с помощью которой производились замеры разницы между параметрами этих профилей.

По значению отклонений указанных выше профилей делается заключение о возможности применения того или иного из предложенных способов формообразования зубьев сателлита при проектировании зацепления ППП.

Разработанные методики настройки, ввода, обработки данных компьютерных исследований моделей ППП путем создания прикладного программного обеспечения в САПР SolidWorks и приложения

COSMOSMotion позволили провести исследования, заключающиеся в определении кинематической погрешности и КПД [1].

На основе исследования компьютерных моделей с круговыми и эвольвентными профилями контактирующих зубьев колес ППП установлено, что по критериям минимальных значений амплитуды кинематической погрешности и максимальному КПД ППП с круговыми профилями зубьев имеют преимущество над ППП с эвольвентными зубьями сателлита (рис. 5).

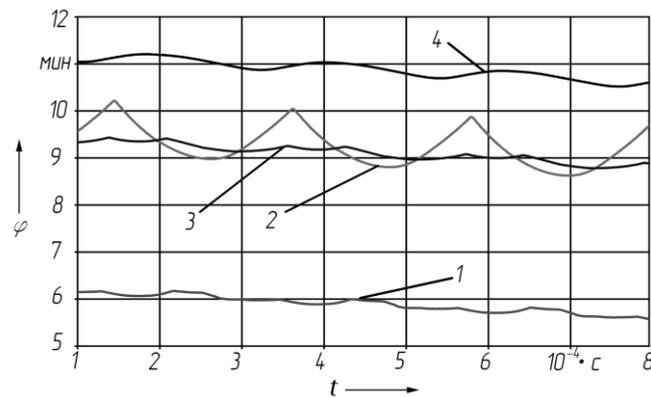


Рис. 5. Зависимость кинематической погрешности от угла поворота входного вала при использовании приближенных профилей зубьев сателлита:  
1 – круговой профиль зубьев; 2 – адаптированные эвольвентные зубья;  
3 – зубья, полученные коническим фрезерованием; 4 – зубья, полученные методом двойного рабочего хода

Среднее значения КПД компьютерных моделей ППП с приближенными профилями зубьев, образованных методами двойного рабочего хода и конического фрезерования, а также с адаптированными эвольвентными зубьями, находятся на одном уровне (примерно 90 %). Однако размах колебаний КПД компьютерных моделей, в зацеплении которых используются адаптированные эвольвентные зубья, в 1,5 раза больше, чем у двух других сравниваемых моделей (рис. 6).

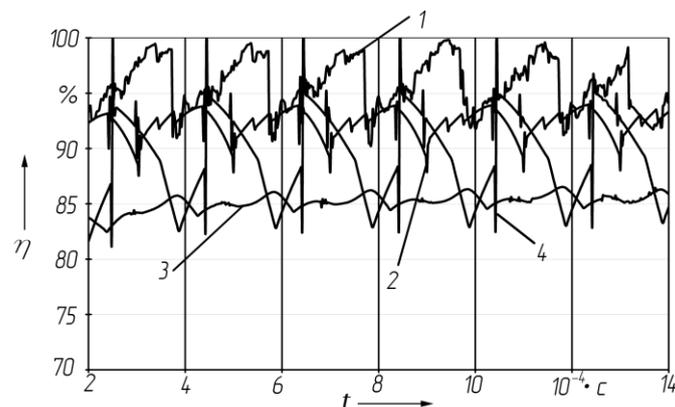


Рис. 6. Зависимость КПД от угла поворота входного вала при использовании приближенных профилей зубьев сателлита, %:  
1 – круговой профиль; 2 – профиль, полученный методом конического фрезерования;  
3 – профиль, полученный методом двойного рабочего хода; 4 – адаптированный эвольвентный профиль

Для проверки адекватности результатов исследований компьютерных моделей был спроектирован мотор-редуктор со сменным внутренним колесом и сателлитом. Это позволило произвести испытания зацепления ППП с профилями зубьев, полученными различными способами формообразования, используя лишь один опытный образец с минимальным суммированием погрешностей изготовления и сборки.

Испытания экспериментальных образцов прецессионных редукторов производились на испытательном стенде кафедры «Теоретическая механика» Белорусско-Российского университета. На данном стенде была определена кинематическая погрешность мотор-редуктора и КПД. В испытательном центре РУП «Могилёвский завод «Электродвигатель» были произведены замеры уровня шума и виброскорости.

Результаты показали, что повышенные уровни шумов наблюдались у прецессионного мотор-редуктора с использованием сателлита с адаптированными эвольвентными зубьями (редуктор № 4). Уровень шума, а также значения виброскорости прецессионных мотор-редукторов с зубьями сателлита, изготовленными способом двойного рабочего хода (редуктор № 2), способом конического фрезерования (редуктор № 3) и способом, при котором в качестве зубьев центрального колеса используются ролики (редуктор № 1), соответствуют техническим требованиям, предъявляемым по этим показателям к серийно выпускаемым аналогам. Результаты испытаний приведены в таблице.

Результаты испытаний прецессионных мотор-редукторов

Номер прецессионного мотор-редуктора	Общий уровень виброскорости, мм/с	Уровень шума, дБ	Кинематическая погрешность, мин	КПД, %
1	8,2	64	46	92
2	12,9	67	53	89
3	11,2	65	53	88
4	15,4	72	65	85

**Заключение.** По результатам исследований разработана конструкция прецессионного мотор-редуктора и изготовлены экспериментальные образцы для привода заглаживающей машины СО-170, которая предназначена для заглаживания бетона. При изготовлении зубьев сателлита мотор-редуктора был использован предложенный способ двойного рабочего хода. На данный момент все пять экспериментальных образцов эксплуатируются в различных строительных организациях. В настоящее время две заглаживающие машины СО-170 со встроенными в их конструкцию прецессионными мотор-редукторами используются на ПРУП «Борисовский хрустальный завод» с организацией производства медицинского стекла, при выполнении работ по заглаживанию бетона организацией «ОДО Трансстрой» (г. Мозырь).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Компьютерное моделирование планетарных прецессионных передач: моногр. / П.Н. Громыко [и др.]; под общ. ред. П.Н. Громыко. – Могилев: ГУВПО «Белорусско-Российский университет», 2007. – 271 с.
2. Громыко, П.Н. Адаптация эвольвентного профиля к условиям работы коническо-цилиндрической прецессионной передачи / П.Н. Громыко, С.Н. Хататовский, Л.Г. Доконов // Детали машин и трибология: межвуз. сб. науч. тр.; Калинингр. техн. ун-т; редкол. С.В. Федоров [и др.]. – Калининград, 2005. – С. 199 – 208.
3. Способ обработки зубчатого изделия с пространственно модифицированными зубьями: пат. 8366 Респ. Беларусь, МПК 7 В 23F 17/00 / П.Н. Громыко, Л.Г. Доконов: заявитель и патентообладатель Гос. учр. высш. проф. образования «Белорусско-Российский университет». – № а20031141; заявл. 03.12.2003; опубл. 30.08.2006. – 3 с.
4. Планетарная прецессионная передача: пат. 11078 Респ. Беларусь, МПК (2006) F 16H 1/32. / П.Н. Громыко, Д.М. Макаревич, С.Д. Макаревич, Л.Г. Доконов: заявитель и патентообладатель Гос. учр. высш. проф. образования «Белорусско-Российский университет». – № а20060411; заявл. 28.04.2006; опубл. 30.08.2008. – 4 с.

Поступила 12.06.2009