

УДК 621.83.06

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПЛАНЕТАРНЫХ РАДИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНЫХ ПЕРЕДАЧ

К. В. САСКОВЕЦ, А. В. КАПИТОНОВ, М. В. ЛЕБЕДЕВ

*Государственное учреждение высшего профессионального
образования «Белорусско-Российский университет»,
г. Могилев, Республика Беларусь*

Ключевые слова: планетарная радиально-плунжерная передача, модель, кинематическая точность, многопериодная дорожка.

Введение

Преимущества планетарных радиально-плунжерных передач заключаются в их небольших габаритах и массе, соосности валов, невысокой стоимости. Эти передачи можно проектировать с большим рабочим диапазоном передаточных отношений: от 3 до 10000. Они могут быть использованы в мехатронных устройствах, приводах промышленных роботов, автоматизированном производстве, где механизмы имеют узлы точной механики и к ним предъявляются высокие требования в отношении кинематической точности.

Первые конструкции планетарных радиально-плунжерных передач разработаны профессором М. Ф. Пашкевичем [1]. Под его руководством проведены теоретические и экспериментальные исследования их кинематических и силовых параметров, которые были продолжены авторами данной статьи с целью улучшения кинематических характеристик этих передач, что позволит повысить их кинематическую точность, при этом обеспечить более высокую надежность и увеличить срок службы [2], [3].

В настоящее время исследования передач, построенных по похожему принципу – с контактными линиями в виде циклоид, проводятся и учеными дальнего зарубежья. Метод анализа контактной динамики многозубчатого контакта в циклоидально-штифтовой передаче предложили ученые LiXin Xua и YuHu Yang [4]. В рамках динамической теории системы нескольких тел создана динамическая модель циклоидально-штифтовой передачи. Теоретическая модель и аналитические результаты были проверены на численном примере и моделировании виртуального прототипа на основе теории динамики нескольких тел.

Методологию оптимизации циклоидных редукторов К-Н-V на основе генетического алгоритма представили исследователи Jian Wang, Shanming Luo, Deyu Su [5]. Цель оптимизации – одновременно минимизировать объем и максимально повысить эффективность редукторов.

Метод анализа кинематических погрешностей и проектирования допусков циклоидальных редукторов был представлен авторами Ken-Shin Lin, Kuei-Yuan Chan, Jyh-Jone Lee [6]. Введены и исследованы отношения между параметрами геометрии, изготовления и точности циклоидального редуктора на основе методов теории зацепления.

Авторы настоящего исследования разработали планетарные радиально-плунжерные передачи, которые имеют более простую конструкцию, лучшие массогабаритные характеристики, более высокую кинематическую точность и плавность работы по сравнению с конструкциями передач, представленными в других работах [1]–[6],

за счет полученной расчетами и моделированием оптимальной геометрии профиля дорожки, по которой перемещаются шары-сателлиты и воспроизводят вращение передачи с высокой точностью.

Работа выполнялась с применением современных методов компьютерного 3D-моделирования конструкций, кинематики и динамики передач.

Основная часть

Для улучшения кинематики и динамики планетарных радиально-плунжерных передач были разработаны конструкции и компьютерные модели с оптимизированным профилем многопериодных дорожек, приближенным к идеальному профилю, обеспечивающему высокую кинематическую точность и плавность работы передачи. Для исследований с помощью технологий компьютерного 3D-моделирования спроектирована модель передачи, включающая основные элементы зацепления, что позволило наиболее эффективно проводить виртуальное моделирование, нагружая элементы передачи такими же моментами, как и при ее работе в производственных условиях. Модель содержит минимальное и при этом достаточное количество деталей, таких, как центральное колесо, эксцентрик, сепаратор, шары-сателлиты. Эти детали были спроектированы в среде Siemens NX, и с помощью импортирования каждой детали в САД системе программы получена модель их сборочного узла. После сборки была проведена проверка на наличие зазоров и интерференции в зацеплении, чтобы исключить заклинивание деталей и образование кинематических погрешностей при моделировании вращения передачи. Модель планетарной радиально-плунжерной передачи изображена на рис. 1.

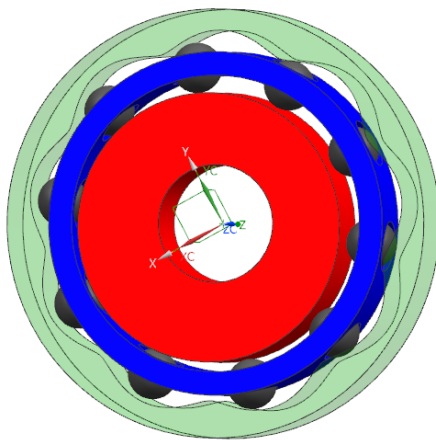


Рис. 1. Модель планетарной радиально-плунжерной передачи для исследования его кинематики и динамики

Спроектированная модель передачи позволяет изучить геометрию дорожки, по которой перемещаются шары-сателлиты, и найти закон их перемещения. Разработано несколько моделей этих передач с различными передаточными отношениями.

При создании модели были заданы связи между ее элементами. Каждая связь имеет свое меню свойств, в котором можно установить массу элемента, моменты инерции по различным осям, как в поступательном, так и во вращательном направлениях. Программа позволяет автоматически вычислить массу детали, исходя из его объема и заданного материала. При необходимости можно задать центр масс. Из полученных связей были созданы узлы путем объединения контактирующих поверхностей модели. В программе отдельно задавался контакт каждого сопрягаемого элемента. В настройках узлов использована возможность регулировать трение, тем

самым приближая передачу к требуемым условиям работы, причем трение можно задать как числовым постоянным значением, так и изменяющимся в виде функции. Устанавливался тип динамического трения. В настройках 3D-контакта были введены жесткость, демпфирование материала.

Для ведущего звена модели задавались различные значения угловых скоростей, а на ведомый вал сепаратора назначались различные нагружаемые моменты. На рис. 1 показана модель передачи с числом шаров-сателлитов 10 и с многопериодной дорожкой колеса, имеющей число периодов 9.

Многопериодная дорожка колеса, по которой перемещаются шары-сателлиты при вращении, сначала была образована сопряжением дуг окружностей и прямых линий [1]–[3]. Поэтому траектория перемещения сателлитов по этой дорожке не была идеальной, а имела геометрические погрешности, что приводило к значительной неравномерности вращения выходного вала, большим колебаниям его угловой скорости, большой кинематической погрешности передачи.

Для повышения кинематической точности моделируемой передачи при описании профиля многопериодной кривой, по которой перемещаются центры шаров-сателлитов, была применена формула окружности в полярных координатах со смещением ее центра на величину A [1]–[4]:

$$\rho = \sqrt{R^2 - A^2 \sin^2 z_2 \varphi} + A \cos z_2 \varphi, \tag{1}$$

где ρ – радиус-вектор точки кривой; A – амплитуда многопериодной кривой; R – радиус средней окружности; z_2 – число периодов кривой; φ – полярный угол.

В формуле (1) при $z_2 = 1$ получаем окружность со смещенным центром, а при $z_2 > 1$ – многопериодную кривую с числом периодов, равным z_2 .

Дорожка колеса с профилем многопериодной кривой, построенной в соответствии с уравнением (1), позволила получить более равномерное вращение выходного вала, меньшие колебания его угловой скорости, меньшие кинематические погрешности передачи.

Для получения оптимального профиля кривой, обеспечивающего высокую кинематическую точность передачи, была проведена параметрическая оптимизация геометрии зацепления передачи и создана программа в среде Excel посредством языка программирования VBA. Программный код приведен в таблице.

Код программы расчета оптимального профиля многопериодной кривой

Код	Описание
Cells.Select	Выделяем все ячейки
Selection.ClearContents	Очищаем выбранное
Dim A(1 To 1000) As Double, r As Integer	Задаем размерность массива
Pi = 3.14159265359	
n = 9	Число циклов
rsphere = 7.5	Радиус сферы
rkyl = 40	Радиус кулачка
smesch = rsphere / 2	Смещение
For f = 0 To 2 * Pi * n Step Pi / 10 / n	Цикл
Range("a1").Offset(u - 1, 0) = (Sqr((((rkyl + rsphere) * Cos(f) ^ 2) + ((smesch + (rkyl + rsphere) * Sin(f) ^ 2))) * Cos(f / n)	Выводим координаты по x

Код	Описание
Range("b1").Offset(u - 1, 0) = (Sqr((((rkyl + rsphire) * Cos(f) ^ 2) + ((smesch + (rkyl + rsphire) * Sin(f) ^ 2))) * Sin(f / n)	Выводим координаты по y
If u = w Then	Условие нахождения координат шариков
Range("d1").Offset(m, 0) = Range("a1").Offset(i, 0)	Выводим координаты по x
Range("e1").Offset(m, 0) = Range("b1").Offset(i, 0)	Выводим координаты по y
m = m + 1	
w = w + 180 * n / (n + 1)	Шаг между точками
End If	Конец условия
u = u + 1	
Next f	Конец цикла

Для параметрической оптимизации геометрии зацепления, математического описания профиля многопериодной дорожки, по которой перемещаются шары-сателлиты при работе передачи, и автоматизации проектирования на основе параметрических уравнений окружностей, центры которых смещены на величину e , и формулы (1) с числом периодов кривой $z_2 > 1$, были выведены уравнения (2) и (3), описывающие оптимизированную кривую многопериодной дорожки. Они использованы в коде программы для построения кривой (таблица):

$$x = \cos\left(f \frac{t}{n}\right) \sqrt{((r_k + r_{ш}) \cos(ft))^2 + (e + (r_k + r_{ш}) \sin(ft))^2}; \quad (2)$$

$$y = \sin\left(f \frac{t}{n}\right) \sqrt{((r_k + r_{ш}) \cos(ft))^2 + (e + (r_k + r_{ш}) \sin(ft))^2}, \quad (3)$$

где n – число циклов; r_k – радиус ведущего кулачка; $r_{ш}$ – радиус шарика-сателлита; e – смещение кулачка; f – число периодов кривой.

При создании модели зацепления планетарой радиально-плунжерной передачи использовался принцип работы исследуемого механизма, при этом строилась кривая, описываемая центром сателлита, перемещающегося с привязкой к входному и выходному звену без проскальзывания. Такая модель дает возможность описать работу механизма с идеальными входными и выходными параметрами, тем самым получить идеальный профиль многопериодной кривой. Модель содержит: кулачок, имеющий радиус R и смещение e ; сепаратор; сателлиты радиуса r .

Созданная программа (таблица) представляет собой математическое представление на основе формул (2) и (3) всех элементов механизма с заданными ограничениями по перемещению. Кулачок является входным валом и вращается по часовой стрелке с угловой скоростью ω_1 . Сепаратор является выходным валом и вращается также по часовой стрелке с угловой скоростью ω_2 . Шары-сателлиты находятся друг от друга на заданном угловом расстоянии $\varphi = \frac{360^\circ}{m}$, где m – число шаров-сателлитов. На рис. 2 представлена модель с заданными ограничениями.

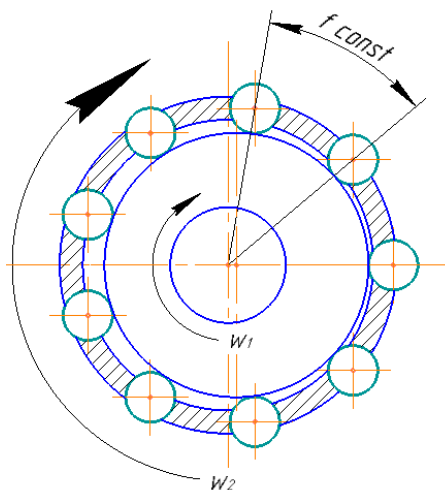


Рис. 2. Модель передачи с заданными ограничениями

В Siemens NX по программе (см. таблицу) и уравнениям (2) и (3) построена многопериодная кривая и многопериодная дорожка центрального колеса передачи, обеспечивающая закон движения шаров-сателлитов, а вместе с ними и сепаратора с выходным валом с высокой геометрической точностью. Окно программы Siemens NX и полученная модель колеса с пятью периодами дорожки представлены на рис. 3.

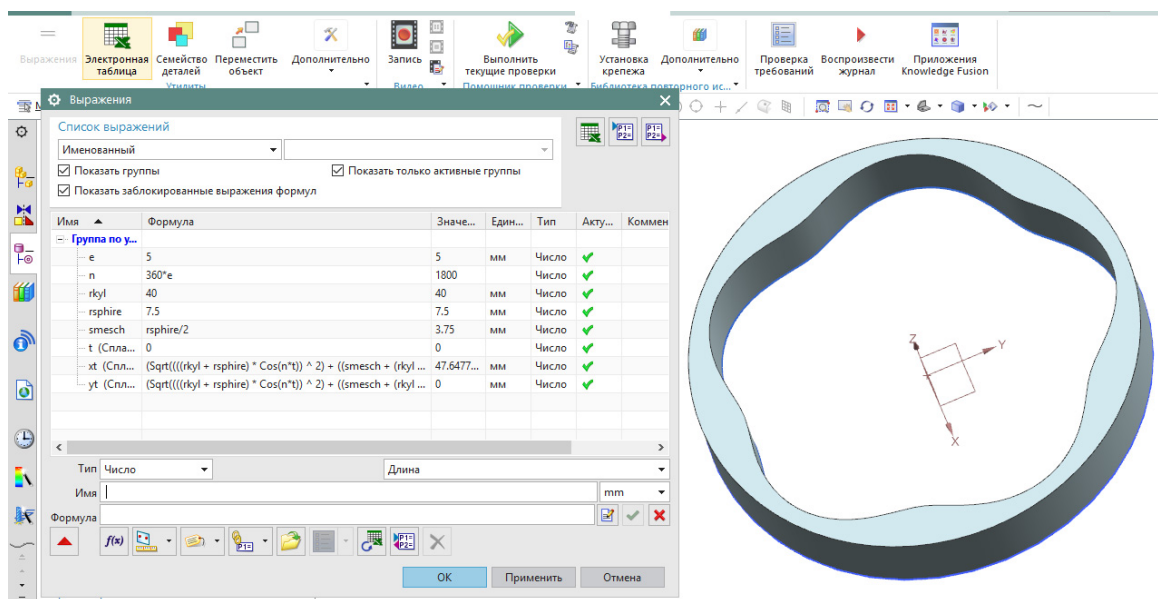


Рис. 3. Окно программы Siemens NX и модель центрального колеса с многопериодной дорожкой

Установлена зависимость между передаточными отношениями исследуемых передач и амплитудами A в соответствии с формулой (1), чтобы исключить образование острых граней из-за пересечения кривых при генерации модели, которые будут неблагоприятно влиять на работу передачи. Модель образования острых граней показана на рис. 4.

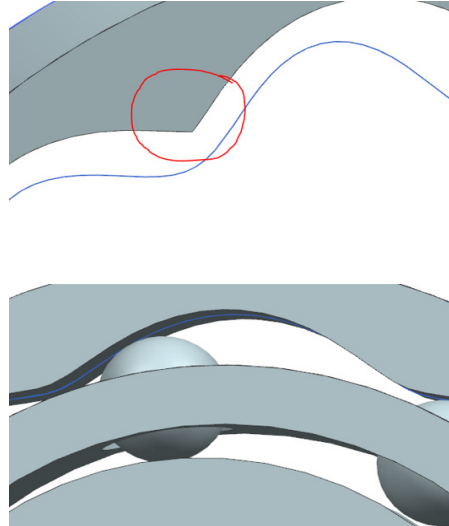


Рис. 4. Модель образования острых граней

Разработана методика проведения исследований кинематической точности радиально-плунжерных передач, которая заключалась в оценке их кинематики и динамики путем симуляции вращения модели с заданными параметрами под нагрузкой и определении при этом угловой скорости, ускорений деталей зацепления, сил и моментов в условиях, близких к эксплуатационным. Модель создана в среде лицензионного программного продукта Siemens NX, и проведено моделирование в модуле Motion Simulation. Для проверки адекватности результатов компьютерного моделирования кинематические характеристики редукторов рассчитывались по формулам, приведенным в работе [1].

На рис. 5 показан график зависимости угловой скорости ω выходного звена планетарной радиально-плунжерной передачи от времени t , полученный при моделировании ее вращения под нагрузкой в среде Siemens NX Motion Simulation. Профиль многопериодной дорожки передачи построен в соответствии с разработанной программой, представленной в таблице, и уравнениями (2) и (3). Модель передачи показана на рис. 1. При моделировании были заданы следующие параметры: передаточное отношение передачи $i = 8$; число периодов дорожки $z_2 = 7$; частота вращения ведущего вала – 600 об/мин; нагрузка на выходном звене – 20 Нм.

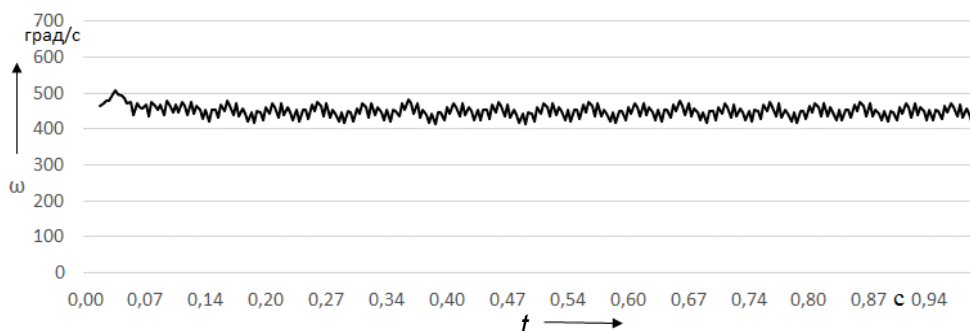


Рис. 5. График угловой скорости планетарной радиально-плунжерной передачи

На графике видно, что непостоянство угловой скорости выходного вала передачи незначительно, и ее колебания не превышают трех процентов от номинального значения, что характеризует высокую плавность вращения разработанной конструк-

ции передачи и ее высокую кинематическую точность. Скачок в начале графика обусловлен резким пуском моделируемого двигателя, что не характеризует работу данного механизма и может быть устранено плавным пуском.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны планетарные радиально-плунжерные передачи, которые имеют более простую конструкцию, лучшие массогабаритные характеристики, более высокую кинематическую точность и плавность работы по сравнению с конструкциями передач, представленными в работах других исследователей, за счет полученной расчетами и моделированием оптимальной геометрии профиля дорожки, по которой перемещаются шары-сателлиты и воспроизводят вращение передачи с высокой точностью.

2. Проведена параметрическая оптимизация геометрии зацепления планетарной радиально-плунжерной передачи, выведены уравнения, описывающие оптимизированную кривую многопериодной дорожки и создана компьютерная программа, позволяющая получить оптимальный профиль дорожки, обеспечивающий высокую кинематическую точность передачи.

3. Получены значения угловой скорости выходного звена планетарной радиально-плунжерной передачи в виде графика при моделировании ее вращения под нагрузкой в среде Siemens NX Motion Simulation, которые показывают, что колебания угловой скорости выходного звена не превышают трех процентов от номинального значения, и подтверждают высокую плавность вращения разработанной конструкции передачи и ее высокую кинематическую точность.

Литература

1. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.
2. Управление точностью планетарных роликовых передач на основе их моделирования и спектрального анализа кинематических погрешностей / М. Ф. Пашкевич [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. – 2002. – № 1 (13). – С. 45–52.
3. Капитонов, А. В. Компьютерное 3D-моделирование конструкций и кинематических параметров планетарных малогабаритных передач / А. В. Капитонов, К. В. Сасковец, А. И. Касьянов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2016. – № 11. – С. 34–40.
4. LiXin Xu Dynamic modeling and contact analysis of a cycloid-pin gear mechanism with a turning arm cylindrical roller bearing / LiXin Xu, YuHu Yang // Mechanism and Machine Theory. – 2016. – Oct. – Vol. 104. – P. 327–349.
5. Jian Wang Multi-objective optimal design of cycloid speed reducer based on genetic algorithm // Jian Wang, Shanming Luo, Deyu Su // Mechanism and Machine Theory. – 2016. – Aug. – Vol. 102. – P. 135–148.
6. Ken-Shin Lin Kinematic Error Analysis and Tolerance Allocation of Cycloidal Gear Reducers / Ken-Shin Lin, Kuei-Yuan Chan, Jyh-Jone Lee // Mechanism and Machine Theory. – 2018. – June. – Vol. 124. – P. 73–91.

Получено 27.11.2018 г.