

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

УДК 629.7.062, 62-231.1

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧИ С ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

Васильев М.А.*, Степанов В.С.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: michael_1987@mail.ru*

***e-mail: stevilen@mail.ru*

Проведено математическое моделирование функционирования волновой передачи с телами качения с различными величинами отклонений от номинальных значений размеров некоторых элементов передачи. Определена кинематическая ошибка передачи при постоянной частоте вращения ведущего вала, проанализирован ее спектральный состав, выявлены зависимости составляющих кинематической ошибки от величин отклонений размеров звеньев передачи — диаметра диска волнообразователя и диаметра тел качения.

Ключевые слова: волновая передача с телами качения, кинематическая ошибка, моделирование механизмов в MSC.Adams, погрешность изготовления.

Введение

В настоящий момент в патентной и технической литературе рассматривается применение волновых передач с телами качения (ВПТК) в составе редукторов электромеханических приводов авиационной и ракетной техники [1, 2]. Выпуск конструкторской документации на ВПТК предполагает определение допусков на размеры и отклонения формы функциональных поверхностей деталей передачи. От размера отклонений, очевидно, зависят мертвый ход и кинематическая ошибка передачи, которые оказывают влияние на точность и устойчивость всего привода. Обеспечение динамических характеристик на всем протяжении срока эксплуатации особенно важно для рулевых приводов авиа-

ционных и ракетных систем, при этом необоснованное ужесточение допусков ведет не только к увеличению стоимости изделия, но и к проблемам в обеспечении широкого диапазона эксплуатационных температур, характерного для военной техники.

Определение влияния возможных технологических отклонений ВПТК на ее кинематическую ошибку рассматривается в работах [3, 4]. Авторы этих работ, используя ряд допущений, определяют статический мертвый ход передачи по ее геометрическим параметрам.

Между тем, кинематическая ошибка определяется не только величиной статического мертвого хода — ее значение зависит от времени, закона

движения и включает в себя как статическую, так и циклические составляющие. Задача определения зависимости кинематической ошибки и ее составляющих от времени при различных законах движения в настоящий момент не решена. Одним из возможных подходов является моделирование функционирования ВПТК в программном комплексе MSC.Adams, который позволяет моделировать статические и динамические состояния машин и механизмов.

Такой подход позволяет моделировать следующие отклонения от номинальных размеров (погрешности):

- погрешность диаметра тел качения;
- погрешность диаметра волнообразователя;
- погрешности размеров отверстий сепаратора под тела качения;
- погрешность при изготовлении профиля жесткого колеса;
- погрешность на равномерное распределение зубьев жесткого колеса;
- погрешность на расположение оси вращения волнообразователя.

В данной работе будет рассмотрено совместное влияние двух отклонений: диаметра диска волнообразователя и диаметра тел качения ВПТК.

Компьютерная модель представляет собой плоскостную либо трехмерную модель механизма, выполненную в одной из CAD-систем, при этом размеры элементов (деталей) установлены с учетом отклонений от номинальных значений.

Подготовка модели ВПТК для моделирования в MSC. Adams

На рис. 1 показано поперечное сечение ВПТК, где 1 — жесткое колесо; 2 — тела качения; 3 — сепаратор; 4 — волнообразователь.

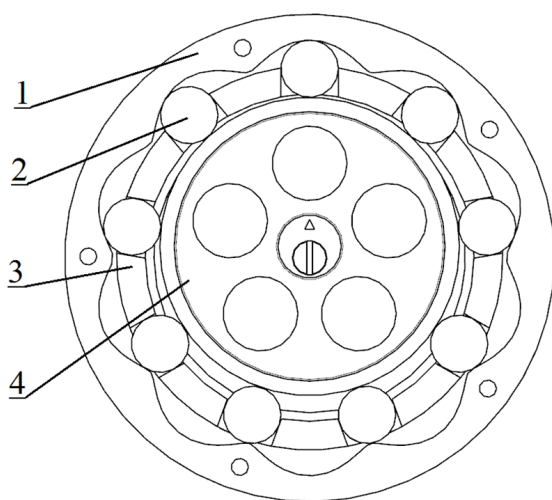


Рис. 1. Исследуемая геометрическая модель ВПТК

В табл. 1 приведены параметры ВПТК, использованные для моделирования.

Таблица 1

Параметры ВПТК

Параметр	Номинальное значение
Диаметр тела качения, мм	20
Тип тел качения	Ролики
Диаметр диска волнообразователя, мм	104
Размер отверстия сепаратора, мм	20
Эксцентриситет, мм	4
Количество тел качения	9
Число периодов жесткого колеса	10

ВПТК в эксперименте работает по следующей схеме: ведущее звено — волнообразователь, неподвижное звено — сепаратор, ведомое звено — жесткое колесо. При отсутствии кинематических ошибок для такой схемы угловая скорость вращения ведомого звена (жесткого колеса) меньше угловой скорости вращения ведущего звена (волнообразователя) в число периодов жесткого колеса, т.е. в 10 раз, при этом направления вращения волнообразователя и жесткого колеса совпадают.

При исследовании ВПТК в MSC.Adams объектом моделирования является двухмерная или трехмерная геометрическая модель ВПТК, в форму и размеры деталей которой внесены изменения, соответствующие технологическим погрешностям, влияние которых требуется выявить. На взаимное положение и движение деталей накладываются следующие ограничения: сепаратор неподвижен; волнообразователь и жесткое колесо могут только вращаться относительно оси передачи; тела качения ограничены возможным контактным взаимодействием с волнообразователем, жестким колесом и сепаратором.

В работе будет исследована кинематическая ошибка при постоянной скорости вращения волнообразователя $\Omega_b = 100$ град/с, что соответствует угловой скорости вращения жесткого колеса 10 град/с, и влияние на кинематическую ошибку двух типов отклонений размеров:

Δ_d — отклонения диаметра диска волнообразователя от номинального значения 104 мм, равные: -0,04 мм, -0,12 мм, -0,20 мм, -0,28 мм, -0,36 мм;

$\Delta_{тк}$ — отклонения диаметра тел качения от номинального значения 20 мм, равные: -0,02 мм, -0,06 мм, -0,10 мм, -0,14 мм, -0,18 мм.

Для каждого из пяти значений отклонения диаметра диска волнообразователя $\Delta_{дi}$ в сочетании с каждым из пяти значений отклонения диаметра тел качения $\Delta_{ткj}$ построена модель ВПТК. Таким образом, рассматривается серия из 25 численных экспериментов.

Кинематическая ошибка $E_{жк}$ в каждый момент времени определяется как разность полученного в результате моделирования угла поворота жесткого колеса $\delta_{жк}$ и расчетного угла поворота жесткого колеса $\delta_{жк}^p$, определяемого через угол поворота ведущего звена $\delta_{волн}$, и передаточное число, равное числу зубьев жесткого колеса $z_{жк}$:

$$E_{жк} = \delta_{жк} - \delta_{жк}^p = \delta_{жк} - \frac{\delta_{волн}}{z_{жк}}$$

При моделировании в MSC.Adams все детали ВПТК рассматриваются как абсолютно жесткие с поверхностью контакта, определенной посредством нелинейного контактного удара. Контактная сила описывается следующим уравнением:

$$F = k \cdot d^a - c \cdot v,$$

где F — сила, действующая на обе поверхности при их соударении; k — коэффициент жесткости; d — условное взаимное проникновение соударяющихся поверхностей; a — экспоненциальная постоянная; c — коэффициент демпфирования; v — отно-

сительная скорость соударяющихся тел в момент касания (вычисляется автоматически в MSC.Adams).

Подбор значений параметров k, a, c рассматривается в работах [5, 6]. Правильный подбор этих параметров определяющим образом влияет на точность результатов моделирования.

Результаты моделирования

На рис. 2,а показаны зависимости кинематической ошибки $E_{жк}$ ВПТК от времени для случаев с $\Delta_{тк} = -0,02$ мм и пятью разными значениями $\Delta_{д}$.

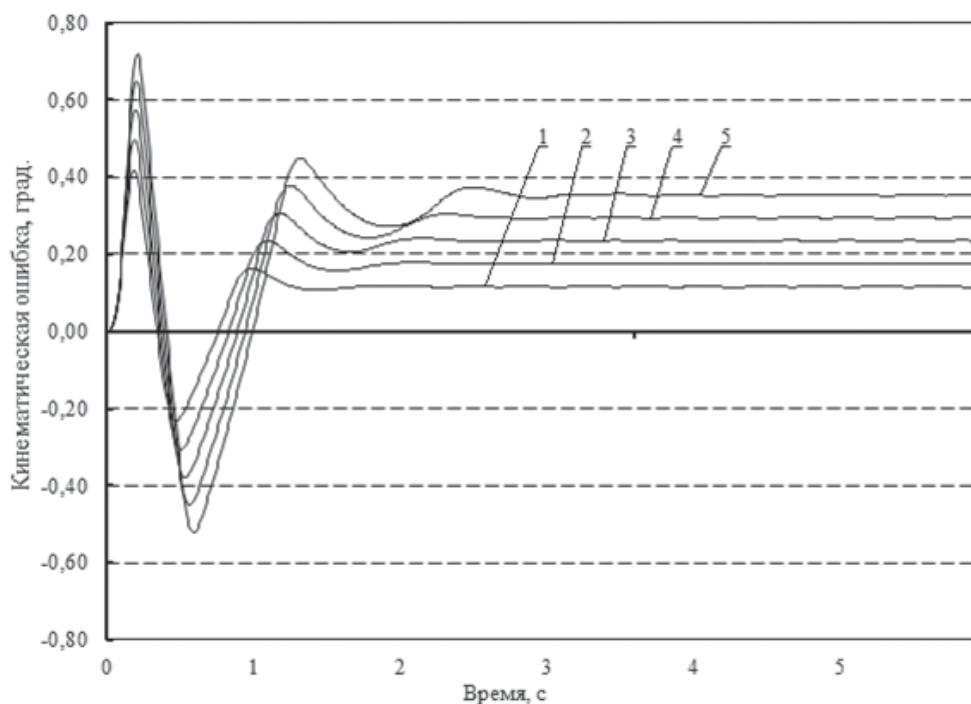
На рис. 2,б показаны те же графики в укрупненном масштабе по оси кинематической ошибки после окончания переходного процесса, связанного с линейным разгоном угловой скорости волнообразователя от нулевого до заданного значения $\Omega_{в} = 100$ град/с.

Анализируя графики, можно выделить следующие составляющие кинематической ошибки:

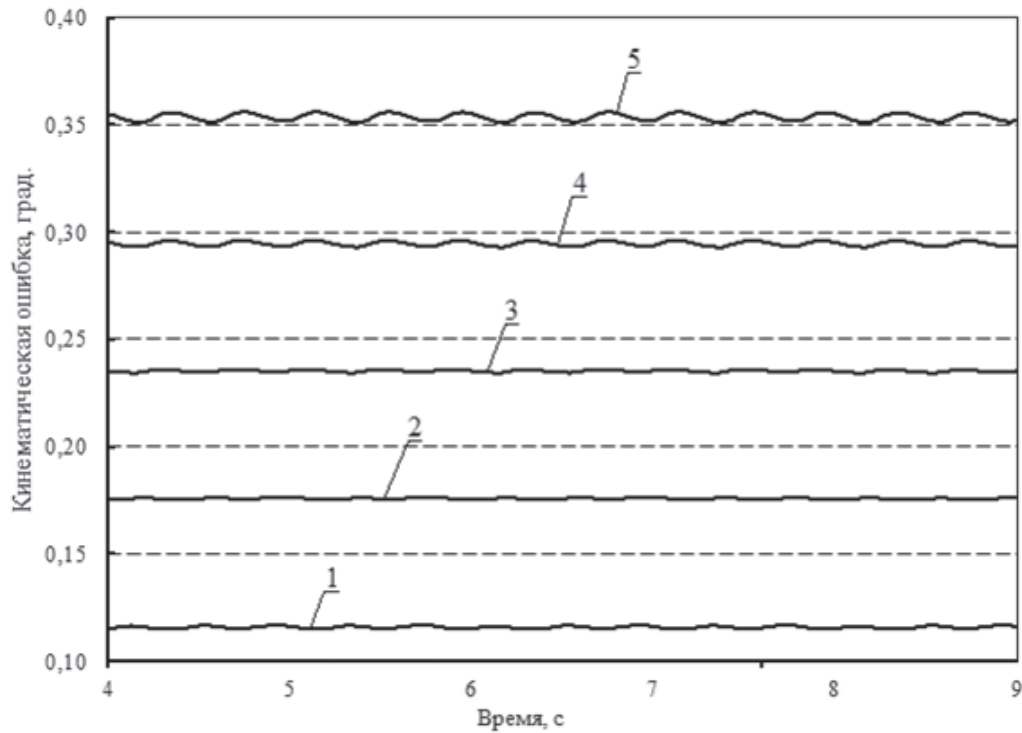
- статическая составляющая (мертвый ход, частота равна нулю);

- высокочастотная составляющая, частота которой выше скорости вращения волнообразователя в количество раз, равное числу тел качения в передаче.

При помощи преобразования Фурье была построена спектральная характеристика кинематической ошибки, из которой были выделены ее составляющие.



а)

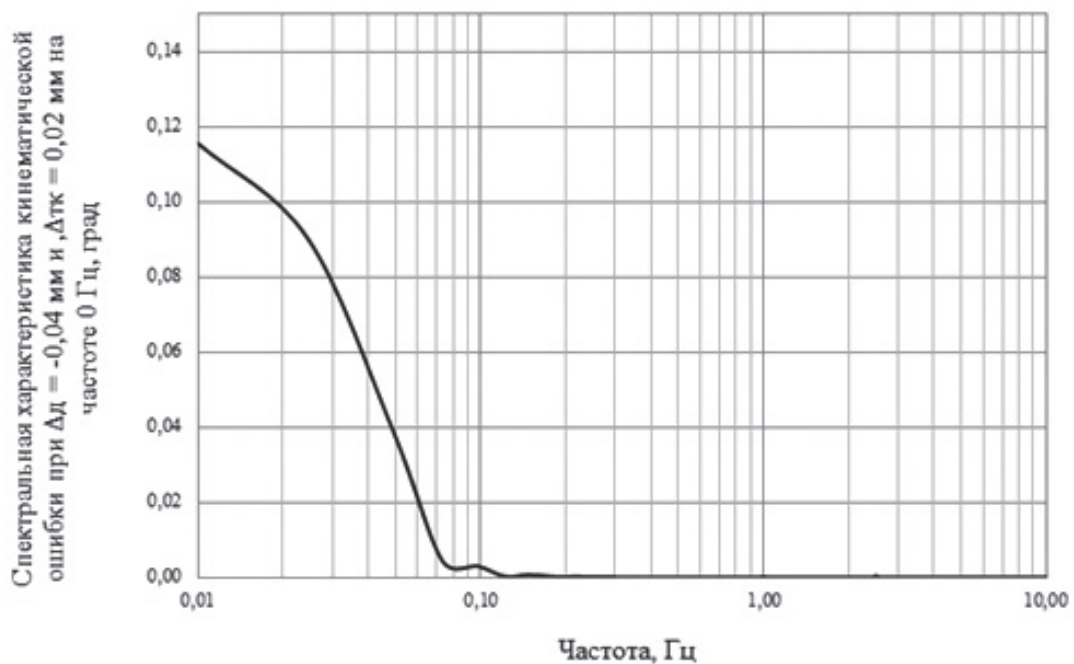


б)

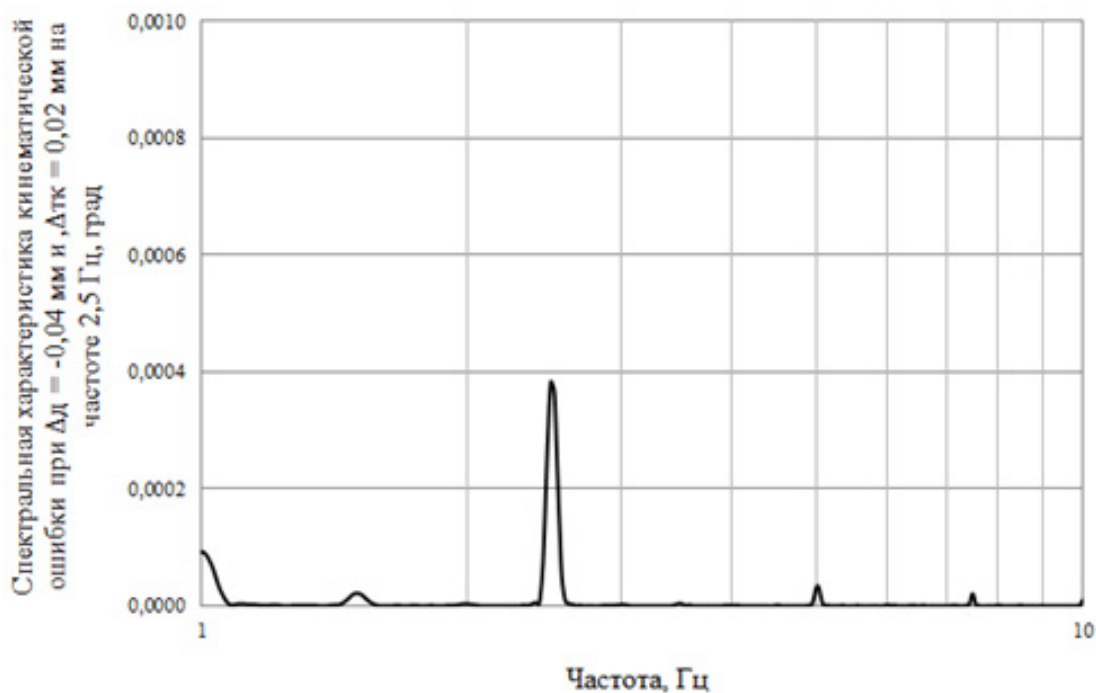
Рис. 2. Кинематическая ошибка ВПТК с отклонением размеров $\Delta_{\text{ТК}} = -0,02$ мм и различными значениями $\Delta_{\text{д}}$ при постоянной скорости вращения волнообразователя: а — от начала движения ($t = 0 \dots 6$ с); б — установившееся движение ($t = 4 \dots 9$ с): 1 — $\Delta_{\text{д}} = -0,04$ мм; 2 — $\Delta_{\text{д}} = -0,12$ мм; 3 — $\Delta_{\text{д}} = -0,20$ мм; 4 — $\Delta_{\text{д}} = -0,28$ мм; 5 — $\Delta_{\text{д}} = -0,36$ мм

На рис. 3,а показана спектральная характеристика кинематической ошибки для одного из экспериментов (при отклонении диаметра волнообразователя $\Delta_{\text{д}} = -0,04$ мм и диаметра тел качения $\Delta_{\text{ТК}} =$

$-0,02$ мм). На рис. 3,б показана эта же спектральная характеристика в укрупненном масштабе, на которой виден локальный максимум в области частоты 2,5 Гц.



а)



б)

Рис. 3. Спектральная характеристика кинематической ошибки: а — на частоте $f = 0,01 \dots 10$ Гц; б — на частоте $f = 1 \dots 10$ Гц

Частота 2,5 Гц соответствует частоте циклических колебаний на рис. 2,б и определяется скоростью вращения волнообразователя и количеством тел качения в передаче:

$$f = \frac{z_{\text{ТК}} \cdot \Omega_{\text{в}}}{2\pi},$$

где $z_{\text{ТК}}$ — число тел качения, $z_{\text{ТК}} = z_{\text{жк}} - 1$.

При $\Omega_{\text{в}} = 100$ град/с и $z_{\text{ТК}} = 9$ циклическая частота составит $f = 2,5$ Гц.

На рис. 4 и 5 показаны величины статической и амплитуды циклической составляющих кинематической ошибки для полного набора численных экспериментов, при этом результаты, соответствующие одному значению Δ_d , соединены отрезками

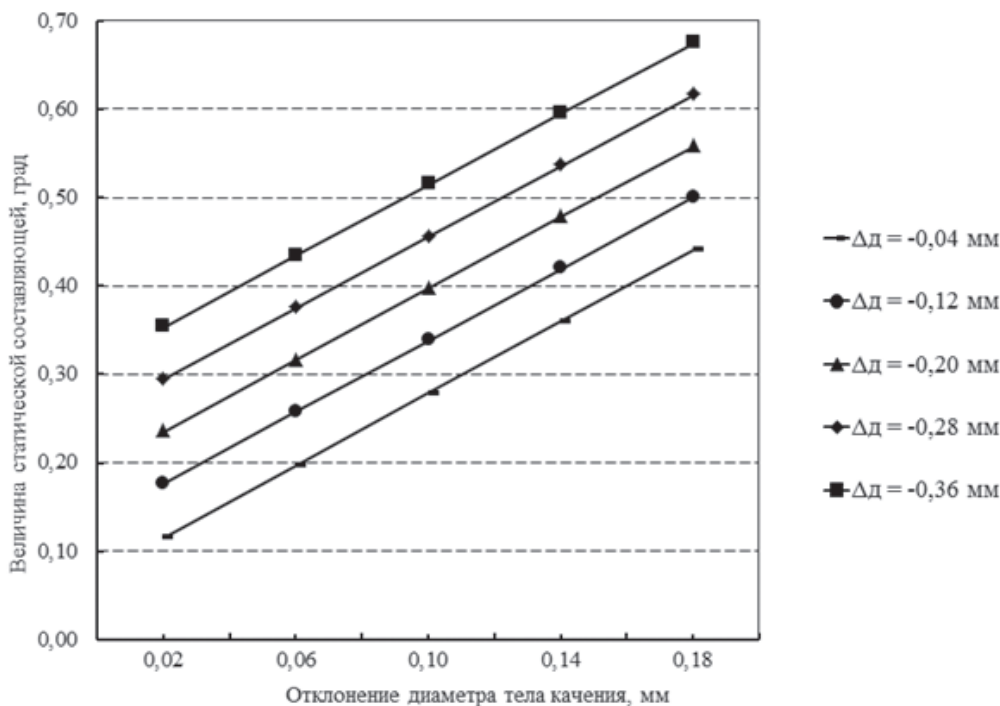


Рис. 4. Статическая составляющая кинематической ошибки ВПТК

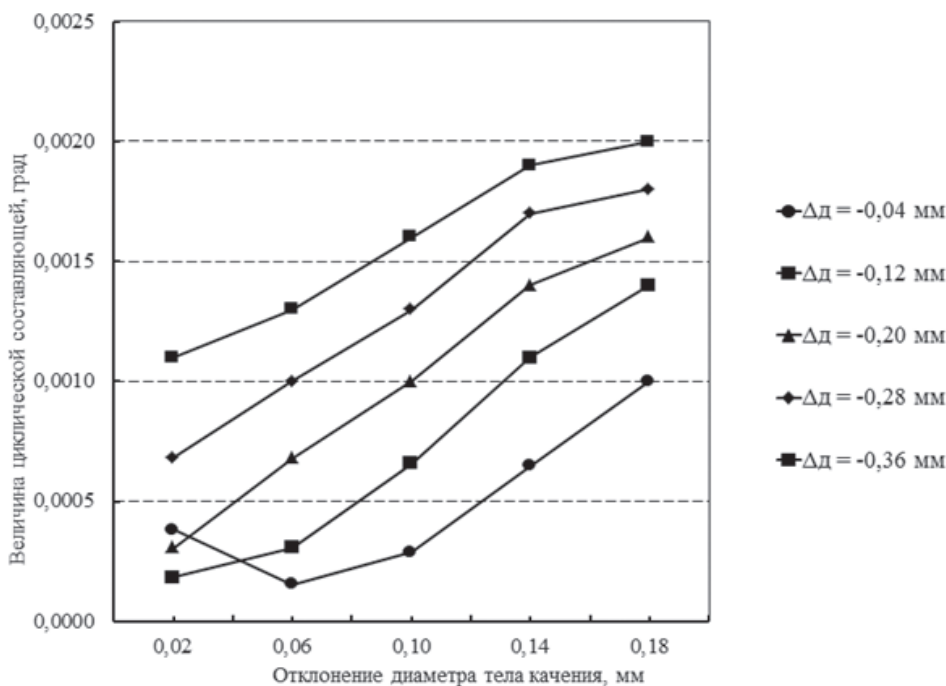


Рис. 5. Циклическая составляющая кинематической ошибки ВПТК

в один график, а по оси абсцисс отложены значения Δ_{TK} .

Выводы

По результатам проведенного исследования можно заключить следующее:

- 1) погрешности в размерах диска волнообразователя и тел качения ВПТК приводят к появлению кинематической ошибки передачи, имеющей статическую и одну гармоническую составляющие, частота последней определяется скоростью вращения волнообразователя и количеством тел качения в передаче;
- 2) мертвый ход ВПТК линейно зависит от погрешности в размерах диска волнообразователя и тел качения;
- 3) циклическая составляющая кинематической ошибки ВПТК приблизительно имеет линейный характер в зависимости от погрешности в размерах диска волнообразователя и тел качения.

Библиографический список

1. Кузьмичев Р.В., Ситин Д.А., Степанов В.С. Исполнительные механизмы петлеобразной формы для приводов самолетов с повышенным уровнем электрификации // Труды МАИ. 2011. №45. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25426> (09.06.2011).
2. Левин А.В., Самсонович С.Л., Степанов В.С., Борисов М.В., Крылов Н.В. Перспективы и проблемы создания электромеханических силовых мини-приводов для нового поколения ЛА // Авиационная промышленность. 2013. №3. С. 8-13.
3. Янгулов В.С., Беляев А.Е. Расчет мертвого хода волновых передач с промежуточными телами качения // Известия Томского политехнического университета. 2008. №3. С. 74-77.
4. Янгулов В.С., Беляев А.Е. Элементы расчета жесткости волновой передачи с промежуточными телами качения // Известия Томского политехнического университета. 2008. №3. С. 69-73.
5. Hsueh-Chien Hou, Yu-Ren Wu. Dynamic simulation and analysis of large-scale gear reducers // Advanced materials research, vol.939, 2014, pp. 530-538.
6. Jochem Giesbers. Contact mechanics in MSC ADAMS // Faculty of Engineering Technology Applied Mechanics, 2012, pp. 20.

WAVE GEAR WITH ROLLER BODIES KINEMATIC ERROR COMPUTER SIMULATION

Vasil'ev M.A. *, Stepanov V.S. **

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: michael_1987@mail.ru

** e-mail: stevilen@mail.ru

Abstract

One of possible approaches to determine kinematic error is functioning modelling in MSC. Adams, which allows investigate static and dynamic characteristics of machinery and mechanisms.

The following errors affect the kinematic error of harmonic gear drive with rolling bodies:

- diameter error of rolling bodies;
- wave former diameter error;
- a rolling body mounting separator aperture sizes error;
- profile of a rigid wheel manufacturing error;
- rigid wheel teeth uniform distribution error;
- wave former axis of rotation position error.

The article presents the results of wave gear with rolling bodies mathematical modeling in MSC.Adams at nominal deviation of sizes of certain parts of the gear. The kinematic error of the gear at a constant rotation frequency was determined, and its harmonic content was analyzed. Dependencies of kinematic error components on the values of the gear links sizes deviations, such as wave former disk diameter and rolling bodies diameter, is revealed.

In accordance with the results of the studies, we can make the following conclusions:

- 1) wave former disk and rolling bodies sizing errors lead to occurrence of gear kinematic error, with one static and one harmonic component, which frequency is determined by the rotation speed of the wave former and the number of rolling bodies of the harmonic gear;
- 2) the backlash of the harmonic gear with rolling bodies linearly depends on an errors in sizes a wave former and rolling bodies;
- 3) the cyclic component of wave gear with rolling bodies kinematic error is approximately of a linear character depending on an error in sizes of a generator wave former and rolling bodies.

Keywords: wave gear with rolling bodies, kinematic error, mechanisms modeling in MSC.Adams, manufacturing error.

References

1. Kuz'michev R.V., Sitin D.A., Stepanov V.S. *Trudy MAI*, 2011, no. 45, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25426> (accessed 09.06.2011).
2. Levin A.V., Samsonovich S.L., Stepanov V.S., Borisov M.V., Krylov N.V. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2013, no. 3, pp. 8-13.
3. Yangulov V.S., Belyaev A.E. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 3, pp. 74-77.
4. Yangulov V.S., Belyaev A.E. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 3, pp. 69-73.
5. Hsueh-Chien Hou, Yu-Ren Wu. Dynamic simulation and analysis of large-scale gear reducers. *Advanced materials research*, 2014, vol. 939, pp. 530-538.
6. Jochem Giesbers. Contact mechanics in MSC ADAMS. *Faculty of Engineering Technology Applied Mechanics*, 2012, pp. 20.