

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИ СБОРКЕ

Б. П. ТИМОФЕЕВ, Н. Т. ДАНГ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: thongdragon.vu@mail.ru

Рассмотрен принцип сборки мелко модульных цилиндрических зубчатых передач, обеспечивающих минимизацию кинематической погрешности согласно ГОСТ 9178-81 и 1643-81. Предложена методика расчета и минимизации кинематической погрешности передач, состоящих из колес, ошибка положения которых соответствует заданной в ГОСТ. Даны оценки кинематической погрешности, приведены рекомендации по выбору взаимного положения зубчатых колес в процессе сборки передач. Отдельно рассмотрены случаи сборки с кратными и некратными передаточными числами.

Ключевые слова: мелко модульные зубчатые передачи, кинематическая погрешность, ГОСТ 9178-81, ГОСТ 1643-81, эффект выставки, начальные фазы гармонических составляющих, степень точности

Введение. Точностные передачи обычно используют при невысоких нагрузках и скоростях. Основным эксплуатационным показателем делительных и других отсчетных передач является высокая кинематическая точность, которая зависит от точности изготовления деталей передачи, выполнения монтажа колес и т.д. При сборке погрешность изготовления готовых деталей зубчатых колес невозможно снизить, в отличие от погрешности передачи [1—3].

В процессе сборки передач, в особенности кинематических, опытным путем необходимо определить такое направление векторов геометрических эксцентриситетов колес, которое обеспечивало бы наибольшую легкость вращения. В настоящей работе это положение определяется расчетным путем. Зуб, с которого начинается положительная ветвь первой гармоники кинематической погрешности колеса, помечен в процессе измерения параметров точности [4—6].

Параметры передачи варьируют в диапазоне:

— передаточное число: целые $u = 1, 2, \dots, 10$; некратные (нецелые), полученные путем уменьшения или увеличения числа зубьев колеса передачи с кратными передаточными числами на один зуб ($u = 17/18; 19/18; 35/18; 37/18; \dots; 179/18; 181/18$);

— модуль передачи: $m = 0,3; 0,5; 0,8; 1$ мм;

— степень точности по ГОСТ 9178-81 и 1643-81: $k = 3—8$.

Расчет для $m = 0,3; 0,5; 0,8$ мм проведен по данным ГОСТ 9178-81*, а для $m = 1$ мм по ГОСТ 1643-81**. Зубчатые колеса с $m = 1$ мм отнесены к крупномодульным, хотя очень широко используются в приборостроении (многократно высказывались мнения специалистов, что деление колеса на крупно- и мелко модульные противоречит функциональному принципу деления передач на кинематические, высокоскоростные и силовые).

Формулы для расчета кинематической погрешности. Кинематическая погрешность передачи F'_{i0} :

* ГОСТ 9178-81. Передачи зубчатые цилиндрические мелко модульные. Допуски. М., Изд-во стандартов, 1981. 40 с.

** ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. М.: ИПК Изд-во Стандартов, 2003. 45 с.

$$F'_{i0} = F'_1 + F'_2, \quad (1)$$

где F'_i — кинематическая погрешность шестерни ($i = 1$) и колеса ($i = 2$).

Кинематическая погрешность колеса:

$$F'_i = F_{pi} + f_{fi}, \quad (2)$$

где F_{pi} — допуск на амплитуду первой гармоники накопленной погрешности шага определяется по табл. 5 ГОСТ 9178-81 (Допуск на накопленную погрешность шага), f_{fi} — погрешность профиля определяется по табл. 6, для передачи с модулем $m = 1$ мм допуски взяты из табл. 7 и 8 ГОСТ 1643-81.

Поскольку частоты F_{pi} оборотные, а f_{fi} — частота входа зубьев в зацеплении, многократно бóльшая частот F_p , принимаем F'_i как сумму постоянного слагаемого f_{fi} и функции F_{pi} от угла поворота φ_i .

Таким образом, необходимо минимизировать кинематическую погрешность передачи за счет выставки геометрических эксцентриситетов колеса в процессе сборки:

$$F'_1 = \frac{F_{p1}}{2} \sin(\varphi_1 + \varepsilon_1) + f_{f1}; \quad F'_2 = \frac{F_{p2}}{2} \sin\left(\frac{\varphi_1}{u} + \varepsilon_2\right) + f_{f2}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — начальные фазы первой гармоники циклической погрешности оборотной частоты шестерни и колеса [7—10].

Положим $\varepsilon_2 = 0, \varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$, тогда

$$F'_{i0} = \frac{F_{p1}}{2} \sin(\varphi_1 + \varepsilon) + \frac{F_{p2}}{2} \sin\left(\frac{\varphi_1}{u}\right) + f_{f1} + f_{f2}, \quad (4)$$

Согласно (4) определяется только часть кинематической погрешности передачи, которую необходимо минимизировать при сборке.

Методика расчета. Суть расчета заключается в определении разности начальных фаз ε колес, при которой суммарная кинематическая погрешность передачи достигает минимума, т.е. размах функции кинематической погрешности передачи минимален. Иными словами, решение задачи заключается в подборе номеров зубьев шестерни и колеса для монтажа в зацепление так, чтобы размах суммарной F'_{i0} был наименьшим. Кинематическая погрешность шестерни и колеса описывается гармонической функцией (3), на колесе и шестерне имеются маркированные зубья, соответствующие началу первой гармоники [11—14].

При $\varepsilon_2 = 0$ необходимо подобрать номер зуба шестерни для монтажа в зацепление с первым зубом колеса. Для $z_1 = 18$ угловой шаг шестерни:

$$p = \frac{360^\circ}{z_1} = \frac{360^\circ}{18} = 20^\circ, \quad (5)$$

так как число зубьев может быть только целым, разность начальных фаз ε может принять только дискретные значения $\varepsilon = 20n, n = 0, 1, 2, \dots, 18$.

На практике такую задачу можно решать следующим образом. Выбирается некоторый зуб как начало отсчета. Все зубья шестерни нумеруются, каждый зуб соответствует одной позиции сборки в зацепление. Затем для каждой позиции проверяется кинематическая погрешность за полный цикл изменения относительного положения зубчатых колес. Ведомое колесо должно повернуться на такой угол, при котором первый зуб ведущего колеса вновь войдет в контакт с первым зубом ведомого колеса. При дальнейшем вращении колес характер изменения F'_{i0} будет повторяться. Сравнение кинематической погрешности всех позиций позволяет подобрать расположение геометрических эксцентриситетов колес с наименьшей погрешностью.

При кратных передаточных числах (z_2 и z_1 имеют наибольший делитель x) рассматриваемый период колеса φ_2 равен $T = 2\pi z_1/x$. При некратных передаточных числах полный период T изменится, если следовать зависимости (4) для F'_{i0} , однако если учесть функциональный характер изменения погрешности профиля f_{fi} и представить F'_{i0} в виде:

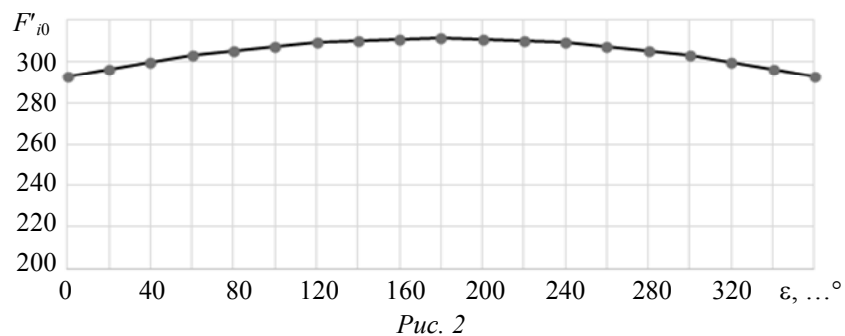
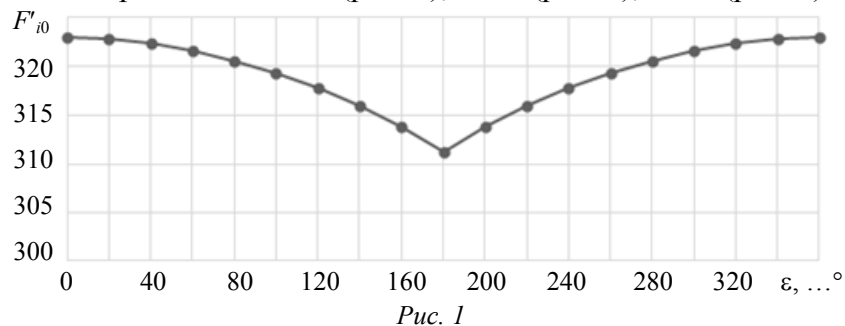
$$F'_{i0} = \frac{F_{p1}}{2} \sin(\varphi_1 + \varepsilon) + \frac{F_{p2}}{2} \sin\left(\frac{\varphi_1}{u}\right) + f_{f1} \sin(\varphi_1 z_1 + \varepsilon_{f1}) + f_{f2} \left(\sin \frac{\varphi_1 z_1}{u} + \varepsilon_{f2} \right), \quad (6)$$

(ε_{f1} и ε_{f2} — начальные фазы циклических погрешностей профиля колес, не связанные друг с другом), то период изменения F'_{i0} изменится. Если считать $f_{fi} = \text{const}$, а F'_{i0} по формуле (4), то $T = 2\pi z_1/x$. Если $f_{fi} = f(\varphi)$, а F'_{i0} считать по формуле (5), период функции резко возрастает — $T = 2\pi z_1 z_2$. При больших значениях передаточных чисел u частота изменения F_{p2} сравнима с f_{fi} . Представленная в настоящей работе методика расчета основана на моделировании передач при вычислении F'_{i0} по формуле (4) с помощью методов MathCad. Предлагаемая методика расчета начальных фаз ε позволяет выбрать теоретический оптимальный вариант сборки зубчатых колес.

Результат исследования. На рис. 1—4 представлены графики кинематической погрешности различных передач при изменении начальных фаз ε . Результаты расчетов демонстрируются для следующих случаев:

- передаточные числа: кратные и некратные, $u = 17/18; 1; 19/18; \dots; 179/18; 10; 181/18$ (были взяты всего 30 случаев);
- модуль передачи: $m = 0,5$ мм;
- число зубьев шестерни $z_1 = 18$, колеса $z_2 = uz_1$;
- степень точности по ГОСТ 9178-81: седьмая;
- кинематическая погрешность передачи указана в микрометрах на делительной окружности колеса d_2 .

Вид зависимости F'_{i0} одинаков: для $u = 1; 5; 9$ (рис. 1), $u = 3; 7$ (рис. 2), $u = 2; 4; 6; 8; 10$ (рис. 3). Приведены кривые для $u = 1$ (рис. 1); $u = 3$ (рис. 2); $u = 2$ (рис. 3).



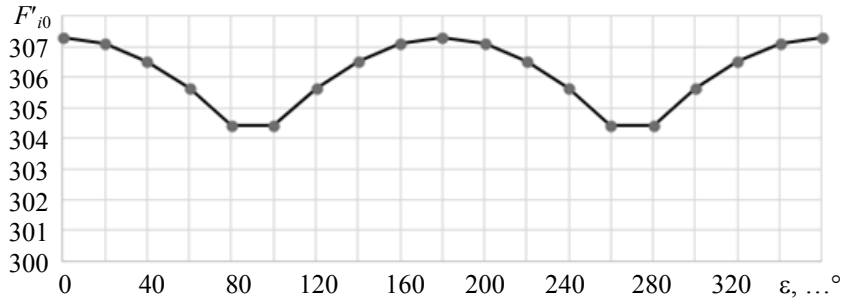


Рис. 3

На рис. 4 представлен график для $u = 17/18$, он является типовым для всех некратных u , т.е. при всех значениях ϵ величина F'_{i0} постоянна.

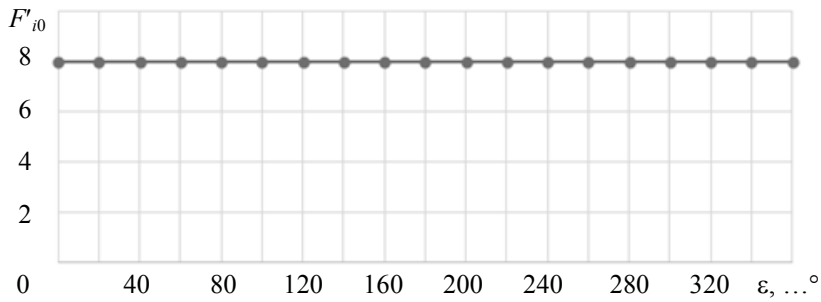


Рис. 4

В результате расчетов установлено, что при u , отличающихся от кратных чисел ($u = 0,94; 1,06\dots$), максимальные F'_{i0} не зависят начальных фаз ϵ , вид кривых F'_{i0} при различных ϵ определяется лишь сдвигом на некоторый угол поворота колеса ϕ (рис. 4). На каждом участке полного цикла изменения относительного положения зубчатых колес T ($T/2$ или $T/3$, $T/4\dots$) четкие локальные экстремумы F'_{i0} зависят от начальных фаз ϵ (кривая похожа на кривую при кратных u). Это связано с равным периодом изменения F'_{i0} , согласно зависимости (4).

Для оценки эффективности минимизации кинематической погрешности предлагаем определим величину „эффекта выставки“:

$$\eta_{\text{выс}} = \frac{F'_{i0\text{max}} - F'_{i0\text{min}}}{F'_{i0}} \cdot 100 \%. \tag{7}$$

Здесь F'_{i0} — кинематическая погрешность согласно верхнему предельному отклонению в ГОСТ, полученная непосредственно сложением амплитуды циклических погрешностей:

$$F'_{i0} = F_{p1} + f_{f1} + F_{p2} + f_{f2}. \tag{8}$$

В табл. 1 приведены значения начальных фаз ϵ для $m = 0,5$ и $k = 3-8$.

Таблица 1

k	ϵ, \dots° , при u									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	180	80	360	80	180	80	0	260	180	80
4	180	80	0	80	180	80	0	80	180	260
5	180	80	0	80	180	100	0	80	180	100
6	180	80	0	100	180	100	0	80	180	260
7	180	80	0	80	180	100	0	80	180	260
8	180	80	0	100	180	80	0	80	180	80

В табл. 2 приведены значения эффекта выставки для кратных u , $m=0,5$.

Таблица 2

k	$\eta_{\text{выс}}, \%$, при u									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	66,7	5,2	17,4	2,2	7,8	1,1	4,1	0,6	3,0	0,5
4	66,7	5,7	17,9	2,2	7,8	1,1	4,4	0,7	3,0	0,5
5	66,7	5,5	17,0	2,2	7,5	1,1	4,3	0,7	2,9	0,5
6	69,6	5,7	17,6	2,2	7,7	1,1	4,4	0,7	3,0	0,5
7	71,0	5,9	17,9	2,2	7,8	1,2	4,5	0,7	3,1	0,5
8	74,4	6,0	18,7	2,3	8,0	1,2	4,6	0,7	3,2	0,5

Выводы

1. При передаточных числах $u = 1, 5, 9$ кривая $F'_{i0}(\varepsilon)$ имеет один ярко выраженный минимум для $\varepsilon = 180^\circ$ (такой характер кривой при $u = 5$ и 9 впервые получен в настоящей работе). Вариант сборки при $F'_{i0\min}$ единственный.
2. При четных передаточных числах ($u = 2, 4, 6, 8, 10$) кривая имеет два минимума, значение $F'_{i0\min}$ обеспечивается при двух различных вариантах сборки.
3. При $u = 3, 7$ $F'_{i0\min}$ получается для $\varepsilon = 0$ (360°). Вариант сборки при $F'_{i0\min}$ единственный.
4. Согласно табл. 2, значение „эффекта выставки“ уменьшается с ростом u , для нечетных и оно существенно выше, чем для четных.
5. Согласно примечанию 3 к табл. 6 [1], эффективность выставки высока при $u = 1, 2, 3$.
6. Эффект выставки практически не зависит от степени точности и модуля зубьев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев Б. П. Повышение качества зубчатых колес и передач путем разработки новых стандартов // Приборы. 2013. № 9(159). С. 37—40.
2. Абрамчук М. В. К новому уровню точности отечественных зубчатых колес, передач и редукторов // Технология машиностроения. 2013. № 1. С. 64—68.
3. Тимофеев Б. П., Абрамчук М. В. Нормы точности зубчатых колес и передач: нужен новый стандарт // Стандарты и качество. 2010. № 5. С. 60—63.
4. Li X., Yang Y., Zou Z. Critical study on the thermal-structural characteristics of worktable assembly of a dry hobbing machine // Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 100(1—4). P. 179—188.
5. Luo M., Zhong S. Non-contact measurement of small-module gears using optical coherence tomography // Applied Sciences (Switzerland). 2018. Vol. 8(12). P. 3—6.
6. Zhang Y., Wang G., Shi W. Optimization of Process Parameters for the Axial Distortion and Distortion Range During Die Quenching of a Spiral Bevel Gear // J. of Materials Engineering and Performance. 2018. Vol. 27(8). P. 3803—3811.
7. Timofeev B., Sachkov M. Approximated rod-toothed gears // Mechanisms and Machine Science. 2018. Vol. 51. P. 419—434.
8. Wang B., Du Y., Xu N. Simulation and experimental verification on dynamic calibration of fuel gear flowmeters // Measurement: J. of the Intern. Measurement Confederation. 2019. Vol. 138. P. 570—577.
9. Huang X., Yuan Y., Ouyang T. Mathematical modeling and dynamic analysis of multi-shaft cylinder gears // J. of Southeast University (Natural Science Edition). 2018. Vol. 48(4). P. 605—612.
10. Тимофеев Б. П., Сачков М. Ю. Передаточные механизмы приводов. СПб: Университет ИТМО, 2015. 103 с.
11. Тимофеев Б. П., Новиков Д. В. Новые стандарты по точности зубчатых колес и передач — необходимое условие повышения конкурентоспособности отечественного редукторостроения // Вестник машиностроения. 2013. № 5. С. 85—87.
12. Boral P., Stoić A., Kljajin M. Machining of spur gears using a special milling cutter // PLoS ONE. 2018. Vol. 25(3). P. 798—802.

13. Zhou Y., Chen Z. C., Tang J. An innovative approach to NC programming for accurate five-axis flank milling of spiral bevel or hypoid gears // *CAD Computer Aided Design*. 2017. Vol. 84. P. 15—24.
14. Wang X., Shi Z. Evaluation system of gear accuracy based on full information // *Scientia Sinica Technologica*. 2017. Vol. 47(1). P. 46—59.

Сведения об авторах

- Борис Павлович Тимофеев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультета систем управления и робототехники; E-mail: timofeev@mail.ifmo.ru
- Данг Нхан Тонг** — аспирант; Университет ИТМО, факультета систем управления и робототехники; E-mail: thongdragon.vn@mail.ru

Поступила в редакцию
25.04.19 г.

Ссылка для цитирования: Тимофеев Б. П., Данг Н. Т. Метод повышения точности мелкозубчатых передач при сборке // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62, № 10. С. 941—946.

METHOD OF IMPROVING THE ACCURACY IN THE ASSEMBLY OF SMALL-MODULE GEARS

B. P. Timofeev, N. T. Dang

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: cainenash@mail.ru

Assembling of small-gear cylindrical gears is considered from the point of view of the requirement to minimize the kinematic error in accordance with State Standards 9178-81 and 1643-81. A method is proposed for calculating and minimizing the kinematic error of gears consisting of wheels with position errors equal to the maximum permissible values specified by the GOST. Estimates of the kinematic error are presented, recommendations for choosing the relative position of the gears in the process of gear assembly are formulated. The cases of assembly with multiple and non-multiple gear ratios are considered separately.

Keywords: kinematic error, GOST 9178-81, GOST 1643-81, exhibition effect, minimization, initial phases of harmonic components, degree of accuracy

REFERENCES

1. Timofeyev B.P. *Pribory*, 2013, no. 9(159), pp. 37–40. (in Russ.)
2. Abramchuk M.V. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2013, no. 1, pp. 64–68. (in Russ.)
3. Timofeyev B.P., Abramchuk M.V. *Standards and Quality*, 2010, no. 5, pp. 60–63. (in Russ.)
4. Li X., Yang Y., Zou Z. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, no. 1-4(100), pp. 179–188.
5. Luo M., Zhong S. *Applied Sciences* (Switzerland), 2018, no. 8(12), pp. 3–6.
6. Zhang Y., Wang G., Shi W. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, no. 8(27), pp. 3803–3811.
7. Timofeev B., Sachkov M. *Mechanisms and Machine Science*, 2018, no. 51, pp. 419–434.
8. Wang B., Du Y., Xu N. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2019, no. 138, pp. 570–577.
9. Huang X., Yuan Y., Ouyang T. *Journal of Southeast University* (Natural Science Edition), 2018, no. 4(48), pp. 605–612.
10. Timofeev B.P., Sachkov M.Yu. *Peredatochnyye mekhanizmy privodov* (Drive Gears), St. Petersburg, 2015, 103 p. (in Russ.)
11. Timofeyev B.P., Novikov D.V. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2013, no. 5, pp. 85–87. (in Russ.)
12. Boral P., Stoić A., Kljajin M. *PLoS ONE*, 2018, no. 3(25), pp. 798–802.
13. Zhou Y., Chen Z.C., Tang J. *CAD Computer Aided Design*, 2017, no. 84, pp. 15–24.
14. Wang X., Shi Z. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, no. 1(47), pp. 46–59.

Data on authors

- Boris P. Timofeev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: timofeev@mail.ifmo.ru
- Dang Nhan Thong** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: thongdragon.vn@mail.ru

For citation: Timofeev B. P., Dang N. T. Method of improving the accuracy in the assembly of small-module gears. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 10. P. 941—946 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-941-946