



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 004.942.62.342
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-5>

Моделирование механизмов как методический инструмент (на примере проектирования циклоидально-цевочной передачи)



Максим СТЕКОЛЬНИКОВ



Людмила МИЛОВАНОВА



Ирина ЧЕЛЫШЕВА

Максим Владимирович Стекольников¹, Людмила Руслановна Милованова², Ирина Александровна Челышева³

^{1, 3} Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия.

² Российский университет транспорта, Москва, Россия.

✉ ¹ stekolnikov2008@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Демонстрируется современный подход к моделированию объектов и систем, позволяющий не только создавать модели, но и на их основе с высокой степенью наглядности и адекватности изучать основные характеристики объекта (системы), в том числе для формирования у молодых инженеров важнейших компетенций по созданию и применению цифровых моделей технических объектов.

Целью исследования является анализ возможностей одной из современных систем автоматизированного проектирования как методического инструмента.

Рассмотрен пример построения модели планетарной циклоидально-цевочной передачи с использованием функциональных возможностей конструкторской САПР. В результате создаётся модель, позволяющая визуализировать кинематику проектируемого механизма в виде статических или подвижных графических изображений. Построенная на основе описанного подхода модель содержит цифровые образы деталей механизма, которые могут без доработки быть

переданы в специализированные программные системы для анализа прочностных характеристик или изготовления материальных макетов изделия с использованием методов быстрого прототипирования.

Предложенный подход позволяет обрабатывать действия по анализу свойств и синтезу новых конструкций с использованием инструментов, соответствующих современному уровню развития техники, и получать наглядное представление о процессе создания машины от математической модели до её материального воплощения.

Методы исследования основаны на базовых принципах математического и имитационного моделирования, анализе данных и их обработке с помощью средств автоматизированного проектирования.

Важным свойством применяемых для моделирования инструментов является возможность реализации на их основе учебного процесса в различных формах организации, в том числе без привязки к конкретным помещениям и оборудованию.

Ключевые слова: транспорт, системы автоматизированного проектирования, планетарный механизм, циклоидально-цевочная передача.

Для цитирования: Стекольников М. В., Милованова Л. Р., Челышева И. А. Моделирование механизмов как методический инструмент (на примере проектирования циклоидально-цевочной передачи) // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 4 (95). С. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-5>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач современного производства, а также подготовки к нему будущих технических специалистов можно назвать необходимость формирования компетенций по созданию комплексных моделей будущих изделий. Неотъемлемой частью этих компетенций является умение использовать различные цифровые инструменты, такие как системы автоматизации математических расчётов, системы автоматизированного проектирования, пакеты разработки иллюстративного материала и подготовки управляющих программ для технологического оборудования.

Целью настоящего исследования является оценка и наглядная демонстрация возможностей использования цифровых инструментов проектирования при разработке конструкции машиностроительного изделия, например, такого как редуктор на основе циклоидально-цевочной передачи. Этот тип механических передач хорошо известен и достаточно широко используется, демонстрируя свою эффективность. Однако в обучающей учебно-методической литературе информация по данному типу передач представлена в сравнительно малом объёме.

Конструктивная схема редуктора [1] представлена на рис. 1. Круглый эксцентрик 1 с осью B вращается вокруг неподвижной оси A . Шайба 3, охватывающая эксцентрик 1, имеет зубья b , входящие в зацепление с круглыми цевками 4, вращающимися вокруг неподвижных осей E . Шайба 6 жёстко связана с валом

2, вращающимся вокруг оси A , и имеет цевки 7, вращающиеся вокруг осей D шайбы 6 и перекатывающиеся по внутренней стороне круглых отверстий, с центром в точке C шайбы 3. Размеры звеньев механизма удовлетворяют условиям $AB = DC$ и $BC = AD$, т.е. фигура $ABCD$ является параллелограммом.

При вращении эксцентрика 1 вокруг оси A шайба 3 входит в зацепление с цевками 4 и тем самым приводит во вращение вал 2.

Передаточное отношение механизма:

$$u_{21} = \frac{Z_4 - Z_3}{Z_3},$$

где Z_4 – число цевок 4;

Z_3 – число зубьев шайбы 3.

При внутреннем циклоидально-цевочном зацеплении [2] профиль зубьев меньшего колеса (сателлита, рис. 2) определяется как расположенная на расстоянии $D_{цев}/2$ эквидистанта 1 к укороченной эпициклоиде 3, формирующейся при обкатке ролика радиусом $r_{оп}$ по окружности 2, радиус которой равен $R_{ок}$ (расстояние от центра ролика до точки, формирующей укороченную эпициклоиду, равно r_u). Полная эпициклоида 4 показана на рис. 2б. Параметры циклоидального профиля связаны между собой зависимостями:

$$r_{оп} = \frac{R_{ок}}{Z_k},$$

где Z_k – число зубьев колеса;

$$R_{ок} = \frac{Z_k}{Z_u} \cdot R_u,$$

где Z_u – количество цевок, расположенных по окружности радиуса R_u .

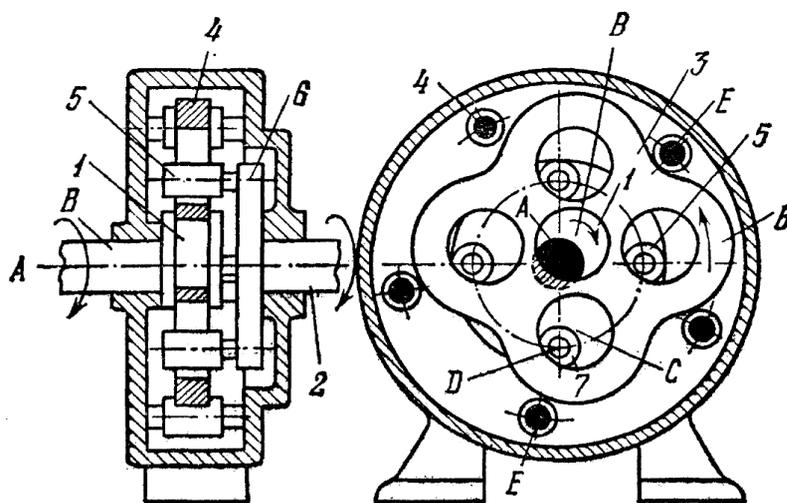


Рис. 1. Циклоидально-цевочный планетарный механизм с внутренним зацеплением [1].



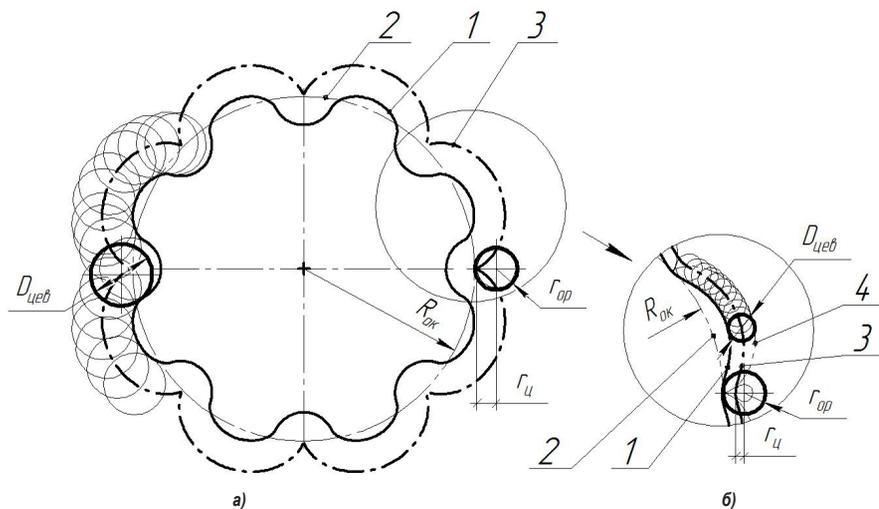


Рис. 2. Схема образования профиля циклоидального колеса (выполнено авторами).

Введём обозначения:

$$a = \frac{r_{ц}}{r_{оп}},$$

$$b = \frac{Z_{ц} - Z_{к}}{Z_{к}}.$$

Тогда параметрические уравнения укороченной эпициклоиды, образующей траекторию перемещения центра цевки относительно колеса, примут вид:

$$\begin{aligned} x(t) &= R_{ок} \cdot [(1+b) \cdot \cos bt - a \cdot b \cdot \cos(1+b)t]; \\ y(t) &= R_{ок} \cdot [(1+b) \cdot \sin bt - a \cdot b \cdot \sin(1+b)t]. \end{aligned} \quad (1)$$

Профиль колеса формируется как внутренняя эквидистанта к укороченной эпициклоиде на основании формул:

$$\begin{aligned} x_{экс}(t) &= x(t) - \frac{\left(\frac{D_{цвб}}{2}\right) \cdot y'(t)}{\sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2}}; \\ y_{экс}(t) &= y(t) + \frac{\left(\frac{D_{цвб}}{2}\right) \cdot x'(t)}{\sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2}}. \end{aligned} \quad (2)$$

производные $x'(t)$, $y'(t)$:

$$\begin{aligned} x'(t) &= R_{ок} \cdot [(1+b) \cdot b \cdot (-\sin bt) - a \cdot b \cdot (1+b) \cdot (-\sin(1+b)t)]; \\ y'(t) &= R_{ок} \cdot [(1+b) \cdot b \cdot \cos bt - a \cdot b \cdot (1+b) \cdot \cos(1+b)t]. \end{aligned}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование проводилось на основании приведённых выше зависимостей с использованием возможностей системы MathCAD. На первом этапе было выполнено построение графиков, позволяющих предварительно оценить вид профиля зубчатого колеса (рис. 3). Укороченная эпициклоида (траектория перемещения центра цевки) со-

ответствует графику 1 на всех рисунках. Различный вид этой траектории соответствует разным значениям параметра a в уравнениях (1). Графики 2 и 3, построенные по уравнениям (2), иллюстрируют положение профиля колеса при разных значениях диаметра цевок $D_{цвб}$.

Функционал системы математического моделирования позволяет быстро построить графическую модель профиля и, не проводя долгих построений, вносить коррективы в параметры и производить обновление вида профиля. Однако для формирования конструкторской документации или непосредственного использования результатов такого расчёта для подготовки данных, на основании которых можно было бы выполнить подготовку технологического процесса, система автоматизации математических расчётов не годится.

Методические рекомендации по построению этого профиля [3–27] фактически предлагают копировать подход, применяемый при проектировании с использованием обычных чертёжных инструментов, только переведённых в цифровой формат. Кривая строится по точкам с использованием кинематического метода для определения координат узлов и встроенных команд системы по построению плавных кривых (NURBS, кривая Безье) по массиву точек. Построение эквидистанты также выполняется с помощью встроенной команды системы. Этот способ является весьма трудоёмким, требует многократного выполнения однотипных операций, что может

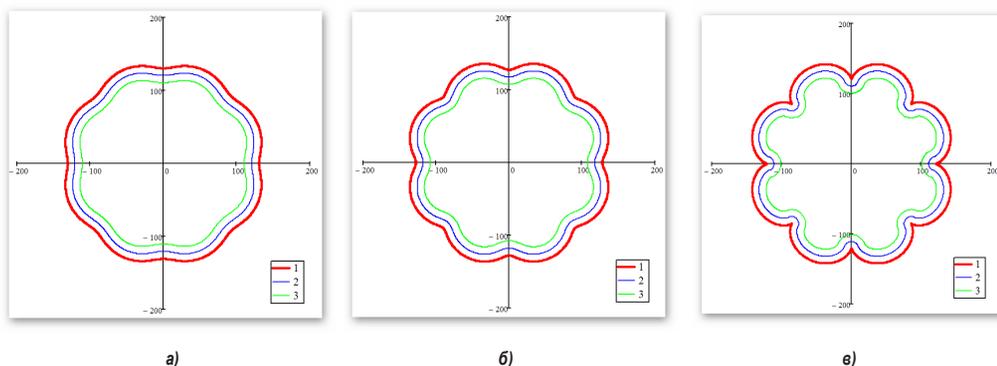


Рис. 3. Результаты моделирования профиля зубчатого колеса в системе автоматизации математических расчётов (выполнено авторами).

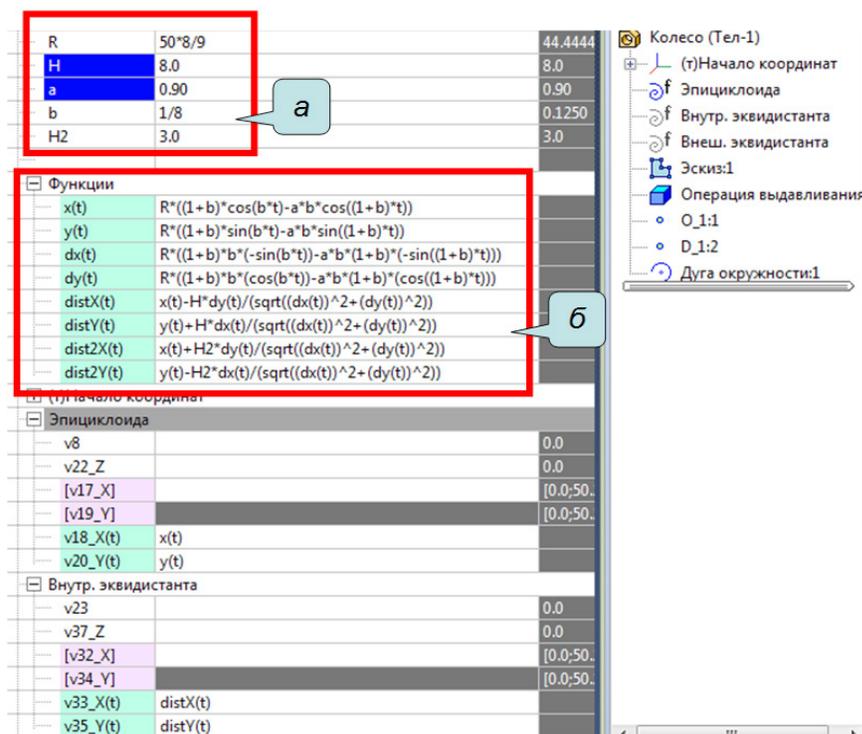


Рис. 4. Система управляющих переменных 3D-модели циклоидального зубчатого колеса (выполнено авторами).

приводить к ошибкам и увеличивает срок проектирования. Особенно это заметно при необходимости внесения корректировок в ранее выполненные построения.

Возможности, которыми обладают современные системы 3D-моделирования, позволяют исключить из процесса разработки 3D-модели выполняемые «вручную» этапы. Для этого используются так называемые параметрические возможности этих систем. Например, если в системе КОМПАС (АС-КОН, Россия) задать группу переменных модели (рис. 4а), соответствующих параметрам формул (1), и группу пользовательских

функций (рис. 4б), воспроизводящих зависимости (2), в пространстве модели формируется кривая, образующая замкнутый контур, к которому применяется операция «выдавливания». В результате получается готовая цифровая 3D-модель.

При необходимости корректировки параметров (диаметры цевок, коэффициенты укорочения, радиус окружности, на которой расположены цевки) можно ограничиться изменением числовых значений в области переменных (рис. 4а), и перестроение контура, а также и всей 3D-модели, будет осуществляться автоматически.



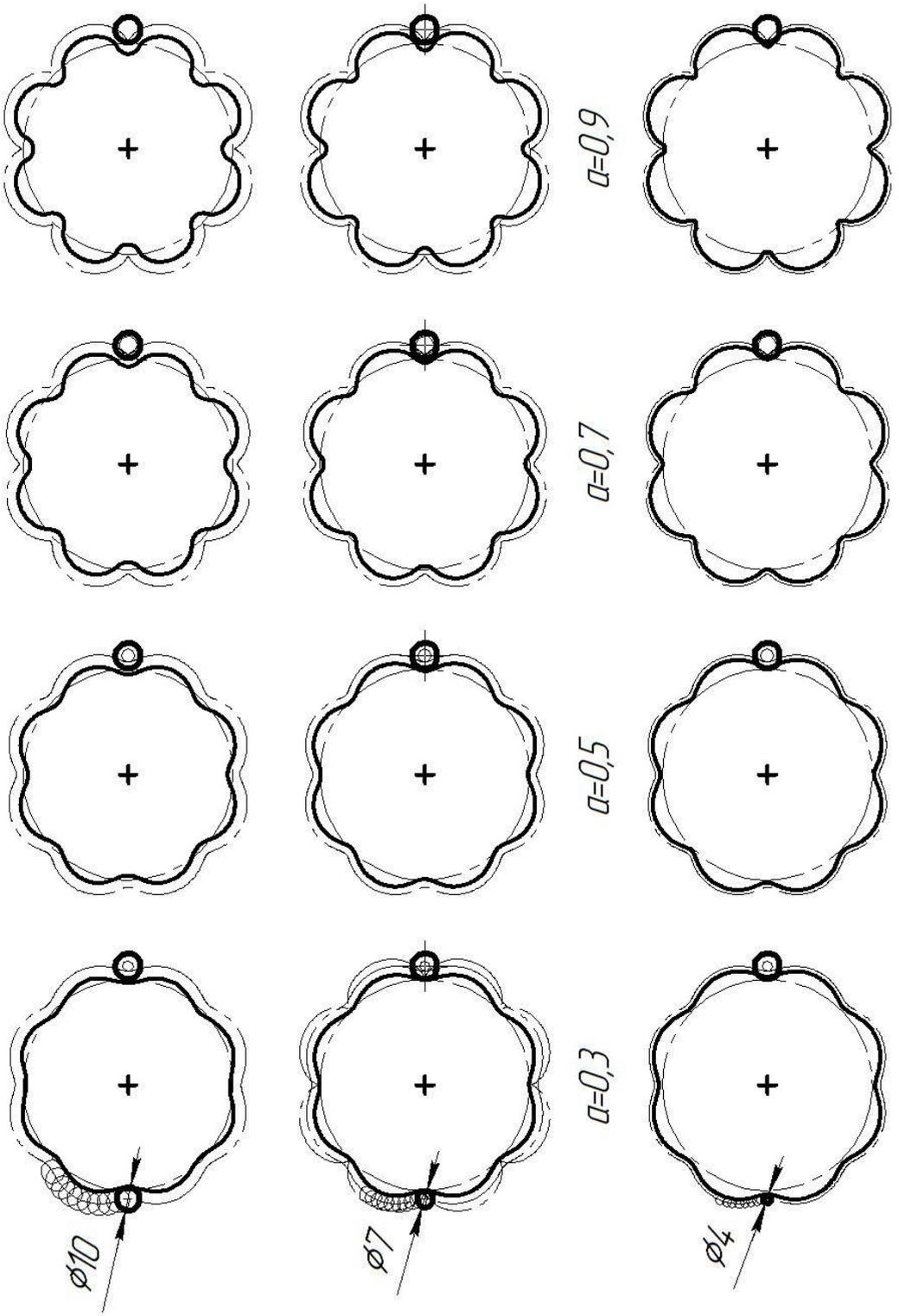


Рис. 5. Рабочие профили циклоидальных колёс, для различных значений параметра $0,3 < a < 0,9$ и диаметра цевки $d_a = 4, 7, 10$ мм (выполнено авторами).

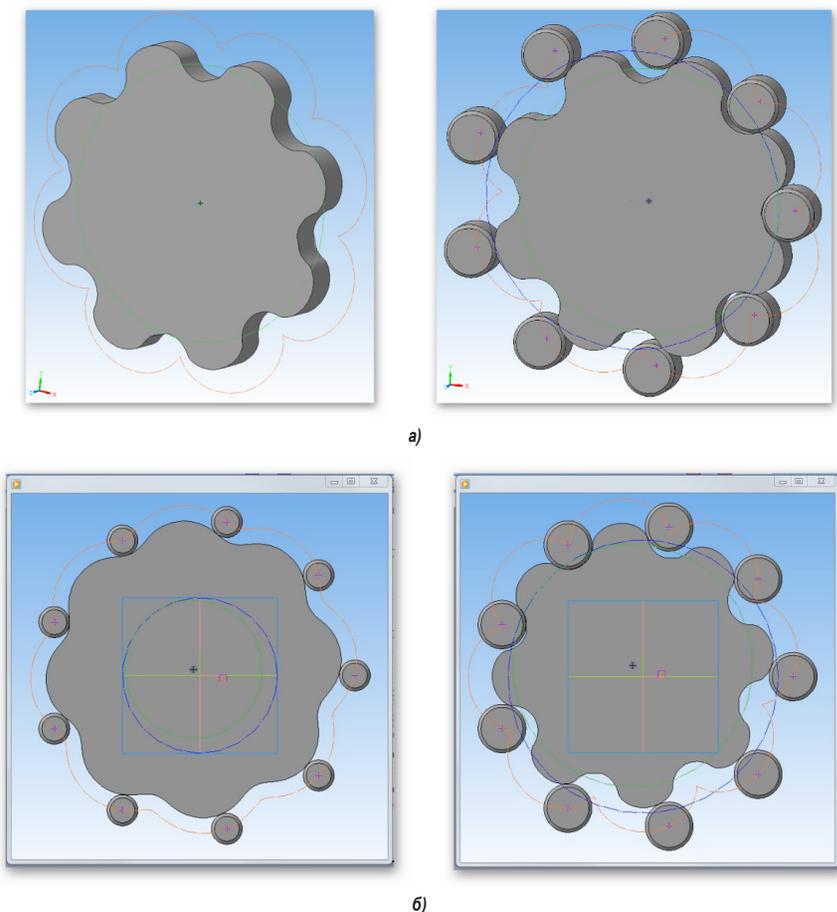


Рис. 6. 3D-модель циклоидально-цевочного зацепления (а) и стоп-кадры видеофайла, сформированные на её основе (б) (выполнено авторами).

Использование такого подхода позволяет значительно повысить гибкость и эффективность процесса проектирования. Представленные на рис. 5 эскизы рабочих профилей циклоидальных колёс и 3D-модели (рис. 6) иллюстрируют возможность быстрого переключения при изменении параметров передачи, в том числе в режиме анимации.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Приведённые результаты моделирования на конкретном примере демонстрируют, что САПР является инструментом, позволяющим напрямую преобразовать аналитические (формульные) описания геометрических объектов в реалистичные цифровые модели, пригодные для их непосредственного использования как объектов анализа ряда физических (массо-центровочные, прочностные характеристики), потребительских (внешний вид, положение «в интерьере») свойств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике: Справочное пособие. В 7 томах. – Т. IV: Зубчатые механизмы. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 592 с. [Электронный ресурс]: https://vk.com/doc212739941_219722791?hash=71ebfd8e567d4457bc. Доступ 21.04.2021.
2. Щербаков Н. Р. Математическое и компьютерное моделирование динамического состояния систем передачи движения // Дис.... д.ф.-м.н. – Томск: ТГУ, 2009. – 213 с. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19225410>. Доступ 21.04.2021.
3. Дорош С. Пошаговое построение эпициклоиды для циклоидального цевочного редуктора. [Электронный ресурс]: <https://www.youtube.com/watch?v=JdY1v36D0Is>. Доступ 21.04.2021.
4. Бубенчиков А. М., Щербаков Н. Р., Становской В. В., Казакиявичюс С. М. Компьютерное моделирование эксцентриковой циклоидально-цевочной передачи // Материалы Международной конференции «Дифференциальные уравнения, теория функций и приложения». – 2007. – С. 562–563. [Электронный ресурс]: http://www.math.nsc.ru/conference/invconf/veku07/abstracts/mat_mod/bubenchikov2.pdf. Доступ 21.04.2021.
5. Вулгаков, Э. Б. Теория эвольвентных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1995. – 320 с. ISBN 5-217-02355-4.





6. Ефременков Е. А. Разработка методов и средств повышения эффективности передач с промежуточными телами качения / Дис... канд. техн. наук. – Томск, Томский политехнический универ., 2002. – 126 с. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19182838>. Доступ 21.04.2021.
7. Ан И-Кан, Беляев А. Е. Синтез планетарных передач применительно к роторным гидромашинам. – Новоуральск: НПИ МИФИ. – 2001. – 90 с. ISBN 5-332-0002-2.
8. Киреев С. О. Планетарные передачи с внецентровым внутренним цевочным зацеплением в машиностроении // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11. – № 7 (58). – С. 1051–1058. [Электронный ресурс]: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/download/824/819>. Доступ 21.04.2021.
9. Киреев С. О. Теоретические основы методов анализа и синтеза планетарных механизмов с внецентроидным цевочным зацеплением / Дис... док. техн. наук. – Новочеркасск: Южно-рус. гос. техн. универ., 2002. – 441 с. [Электронный ресурс]: <http://www.dslib.net/organizaciya-proizvodstva/teoreticheskie-osnovy-metodov-analiza-i-sinteza-planetarnyh-mehanizmov-s.html>. Доступ 21.04.2021.
10. Кобза Е. Е., Ефременков Е. А., Демидов В. Н. Анализ распределения усилий в зацеплении циклоидальной передачи с учётом погрешностей изготовления звеньев // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 22–26. [Электронный ресурс]: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/4357/1/bulletin_tpu-2012-321-2-05.pdf. Доступ 21.04.2021.
11. Крайнев А. Ф. Механика машин. Фундаментальный словарь. – М.: Машиностроение. – 2001. – 904 с. ISBN 5-217-0790-8.
12. Леонтьев Н. В., Мугин О. Г., Мугин О. О. Механические передачи на основе эпициклоиды и гипоциклоиды // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (5). – С. 2308–2310. [Электронный ресурс]: http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/19931778_2011_-_4-5_unicode/141.pdf. Доступ 21.04.2021.
13. Мугин О. Г., Мугин О. О., Синев А. В. О замечательных свойствах эпициклоиды и гипоциклоиды в применении к механическим передачам // Вестник научно-технического развития. – 2013. – № 1 (65). – С. 28–32. [Электронный ресурс]: <http://www.vntr.ru/frpgetfile.php?id=658>. Доступ 21.04.2021.
14. Сергеев В. И. Методологические основы повышения точности механизмов с высшими кинематическими парами // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2006. – № 1. – С. 3–9. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9188440>. Доступ 21.04.2021.
15. Сирицин А. И., Башкиров В. Н., Широких Э. В. Статическая крутильная жёсткость привода станка на основе циклоидально-цевочной передачи // Вестник машиностроения. – 2015. – № 1. – С. 3–7. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23727661>. Доступ 21.04.2021.
16. Фомин М. В. Планетарно-цевочные передачи. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009. – 64 с. ISBN 978-5-7038-3309-4. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29791168&>. Доступ 21.04.2021.
17. Suciu, F., Dăscălescu, A., Ungureanu, M. From design to manufacturing of asymmetric teeth gears using computer application. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017, Vol. 200, pp. 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/200/1/012012.
18. Fedosovskii, M. E., Aleksanin, S. A., Nikolaev, V. V., Yegorov, I. M., Dunaev, V. I., Puctozerov, R. V. The Effect of a Cycloid Reducer Geometry on its Loading Capacity. World Applied Sciences Journal, 2013, Vol. 24, No. 7, pp. 895–899. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.24.07.13352. [Электронный ресурс]: [https://www.idosi.org/wasj/wasj24\(7\)13/11.pdf](https://www.idosi.org/wasj/wasj24(7)13/11.pdf). Доступ 21.04.2021.
19. Sun, Y., Guan, T. The Modeling and Simulation Method to Calculate Force in the Equivalent Substitution Flank Profile Two Tooth Difference Cycloid Pin Gear Reducer Cycloid Gear. 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2010, pp. 729–733. DOI: 10.1109/ICDMA.2010.192.
20. Hidaka, T., Wang H., Ishida, T., Matsumoto, K., Hashimoto, M. Rotational transmission error of K-H-V planetary gears with cycloid gear. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 1994, Vol. 60, No. 570, pp. 645–653. DOI: <https://doi.org/10.1299/kikaic.60.645>.
21. Lai, Ta-Shi. Design and machining of the epicycloid planetary gear of cycloid drives. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, No. 28, pp. 665–670. DOI: 10.1007/s00170-004-2423-x.
22. Li, Chongning; Liu, Jiyang; Sun, Tao. Study on transmission precision of cycloidal pin gear in 2K-V planetary drives. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, Vol. 37, No. 4, pp. 61–65. [Электронный ресурс]: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-JXXB200104013.htm. Доступ 21.04.2021.
23. Litvin, F., Fuentes, A. Gear Geometry and Applied Theory. 2nd ed. Cambridge University Press, 2004, 800 p. DOI: 10.1017/CBO9780511547126.
24. Shirokoshi, Norio; Hidaka, Teruaki; Kasei, Shinji. Studies of Influences of Geometrical Errors to Final Performances in Small Backlash Planetary Gears: Relations Among Position Deviations of Planet Gears, Target of Backlash and Non-Working Flank Load. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 2000, Vol. 66, No. 646, pp. 1950–1958. DOI: 10.1299/kikaic.66.1952.
25. Sun, Y. G., Zhao, X. F., Jiang, F., Zhao, L., Liu, D., Lu, G. B., Yu, G. Backlash analysis of RV reducer based on Error Factor Sensitivity and Monte-Carlo Simulation. International Journal of Hybrid Information Technology, 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 283–292. DOI: 10.14257/ijhit.2014.7.2.25.
26. Terada, Hidetsugu. The Development of gearless reducers with rolling balls. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, No. 24, pp. 189–195. DOI: 10.1007/s12206-009-1155-0.
27. Yang, D. C. H., Blanche, J. G. Design and application guidelines for cycloid drives with machining tolerances. Mechanism and Machine Theory, 1990, Vol. 25, No. 5, pp. 487–501. DOI: 10.1016/0094-114X(90)90064-Q. ●

Информация об авторах:

Стекольников Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент Саратовского государственного технического университета имени Ю. А. Гагарина (СГТУ имени Ю. А. Гагарина), Саратов, Россия, stekolnikov2008@mail.ru.

Милованова Людмила Руслановна – кандидат технических наук, доцент Российского университета транспорта, Москва, Россия, sarmilovanova@mail.ru.

Чельшьева Ирина Александровна – кандидат технических наук, доцент Саратовского государственного технического университета имени Ю. А. Гагарина (СГТУ имени Ю. А. Гагарина), Саратов, Россия, etingig@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 05.05.2021, одобрена после рецензирования 26.08.2021, принята к публикации 10.09.2021.