DOI 10.52209/1609-1825_2022_3_17 УДК 62-233.3/.9

Компьютерное моделирование динамической работы цилиндрической зубчатой передачи

[1]**НОГАЕВ Кайрош Абилович,** *к.т.н., доцент, nk-1912@mail.ru,*
[1]***АБИШКЕНОВ Максат Жарылгасынович,** магистр, преподаватель, maks91.kz@inbox.ru,*
[1]**КЫДЫРБАЕВА Салтанат Жайсанбековна,** *магистр, преподаватель, t-slastena@mail.ru,*
[1]**КУЗЬМИН Виктор Сергеевич,** *студент, viktorjomik2@gmail.com,*
[1]*НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан, Темиртау, пр. Республики, 30,*
**автор-корреспондент.*

***Аннотация.** В статье приведены результаты исследования динамической работы цилиндрической зубчатой передачи методами компьютерного моделирования. Рассмотрены подготовка геометрической и расчетной модели объекта для моделирования в среде инженерного анализа программы Autodesk Inventor. В ходе компьютерного моделирования установлены соответствие расчетной модели реальному физическому объекту и возможность учета нелинейных эффектов, определяемых условием потери контакта зубьев. Показатели силового взаимодействия зубчатого зацепления отражают динамические нагрузки, вызываемые нелинейным поведением системы. Приведенная методика компьютерного моделирования может быть использована для определения путей снижения нагрузок и оптимизации конструктивных параметров механических передач.*

***Ключевые слова:** компьютерное моделирование, зубчатая передача, Autodesk Inventor, расчетная модель, динамика, силовое взаимодействие.*

Введение

Зубчатые передачи как составная часть различных машин и оборудования широко применяется в технике для выполнения различных задач. Существующие аналитические методы расчета зубчатых передач основаны на различных упрощениях и допущениях. Например, в инженерной практике при расчете зубьев цилиндрической передачи на изгиб зуб рассматривается как консольная балка прямоугольного сечения, а нагрузку, действующую в зацеплении, считают приложенной к концу этой балки [1]. Упрощения и допущения в аналитических расчетах зубчатых передач приводят к чрезмерному запасу прочности и увеличению весогабаритных параметров. Вместе с тем, в рыночных условиях одним из важных факторов конкурентоспособности машиностроительных изделий, является оптимальное сочетание весовых и прочностных характеристик. Оптимизацию этих параметров можно осуществить на основании компьютерного моделирования, позволяющего учитывать различные внешние факторы в совокупности с нелинейностями в реальных системах [2].

Методы и материалы

В качестве объекта компьютерного моделирования принята цилиндрическая зубчатая передача одноступенчатого редуктора с параметрами: число зубьев шестерни $z_1 = 26$; число зубьев колеса $z_2 = 130$; модуль $m_n = 2{,}5$ мм; угол наклона зубьев на делительном цилиндре $\beta = 12°50'$; ширина зубчатого венца шестерни $b_1 = 85$ мм; ширина зубчатого венца колеса $b_2 = 80$ мм; частота вращения ведущего вала $n_1 = 974$ об/мин; вращающий момент на валу колеса $T_2 = 625 \cdot 10^3$ Н·мм [3].

Объемные геометрические модели элементов цилиндрической зубчатой передачи, необходимые для компьютерного моделирования в системе инженерного анализа Autodesk Inventor, созданы с помощью модуля расчета механических передач приложения «Валы и механические передачи 2D» CAD-системы КОМПАС-3D [4]. Применение расчетного модуля приложения «Валы и механические передачи 2D» позволило точно воспроизвести сложные геометрические элементы зубчатого зацепления, такие как эвольвентные профили зубьев. Для экспорта геометрических моделей, созданных в CAD-системе КОМПАС-3D, в систему компьютерного моделирования Autodesk Inventor они сохранены в STEP-файл, позволяющий обмениваться данными 3D-моделей между CAD-программами.

Геометрическая модель в виде сборки, необходимая для динамического моделирования, создана в системе Autodesk Inventor вставкой и позиционированием компонентов зубчатой передачи

путем назначения между деталями статических зависимостей (рисунок 1) [5].

Компьютерное моделирование работы цилиндрической передачи реализовано в модуле «Динамическое моделирование» системы Autodesk Inventor в порядке, приведенном в работах [6, 7].

В ходе подготовки расчетной модели, в первую очередь, установлены неподвижные элементы узла цилиндрической зубчатой передачи, путем назначения их базовыми в геометрической модели. При запуске модуля «Динамическое моделирование» сборочные зависимости между отдельными элементами геометрической модели автоматически преобразованы в стандартные соединения, созданы три стандартных соединения «Вращение». Между вал-шестерней и колесом задано силовое соединение «3D контакт» для моделирования контактного взаимодействия зубьев передачи.

Исходя из условий задачи определены параметры соединений. В соединении «Вращение:3» между опорой и вал-шестерней включено вынужденное движение с постоянной скоростью 5844 град/с, что соответствует 974 об/мин по условию задачи. В соединении «Вращение:2» заблокированы степени свободы, для имитации шпоночного соединения между ними. Для силового соединения «3D контакт» назначены: жесткость – 15000 Н/мм (использовано среднее значение из работы [8]), демпфирование – 5 Н·с/мм (соответствует значению окружной скорости и жесткости рассматриваемой передачи), коэффициент трения – 0,1 [9]. На выходном конце ведомого вала приложена внешняя нагрузка – крутящий момент, равный 625000 Н·мм.

Для моделирования в симуляторе принято 5 секунд работы зубчатой передачи, что будет достаточным для установления характера изменений необходимых величин. После запуска расчета для отображения характера изменения требуемых величин включено устройство графического вывода (рисунок 2).

Основные результаты исследования и их обсуждение

Для анализа результатов компьютерного моделирования выбраны показатели скорости вращения ведомого звена и силы взаимодействия между вал-шестерней и колесом (рисунок 3).

Среднее значение скорости вращения ведомого вала – 1168,2 град/с, полученное в ходе компьютерного моделирования, практически не отличается от расчетного значения – 5844/5 = 1168,8 град/с (130/26 = 5 – передаточное число), что показывает правильность функционирования модели и достаточный уровень соответствия расчетной модели реальному физическому объекту. Колебания скорости вращения ведомого звена объясняется потерей упругой и демпфирующей связей в зацеплении, вследствие размыкания зубьев при работе передачи [10]. Таким образом, компьютерное моделирование с помощью программного комплекса Autodesk Inventor позволяет учесть нелинейные эффекты, определяемые условием потери контакта зубьев.

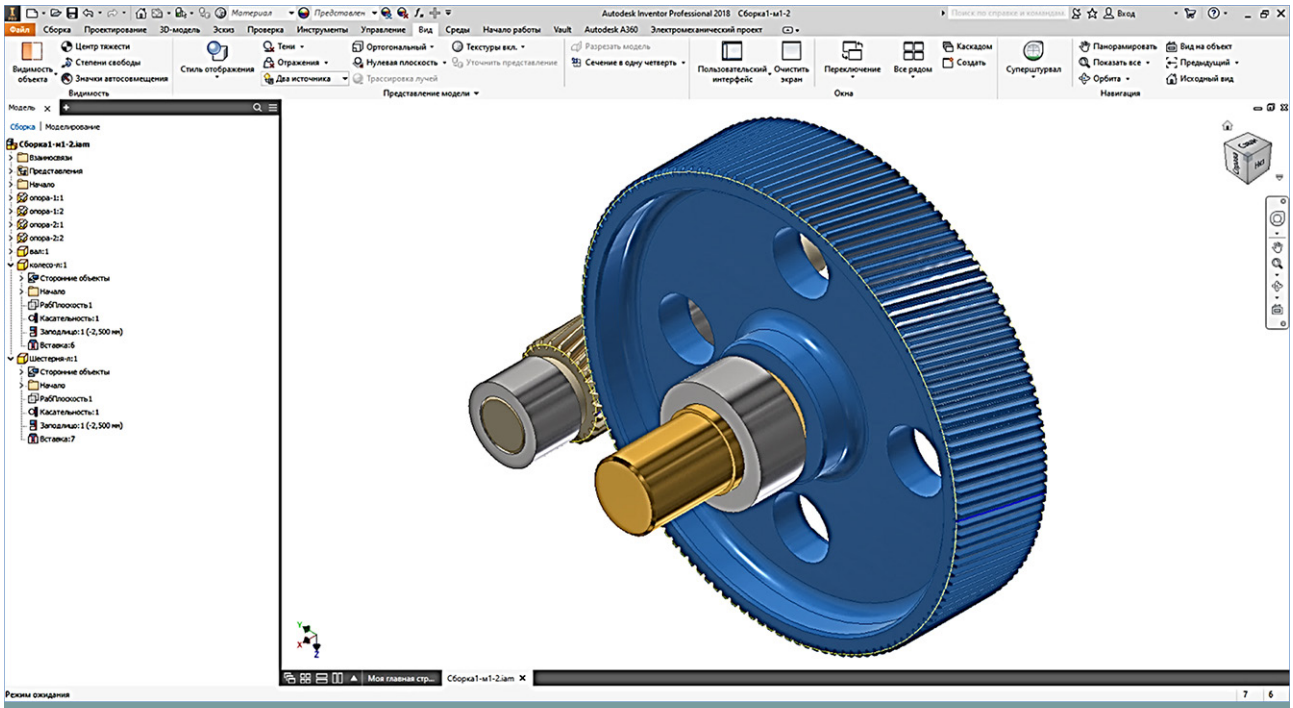

Рисунок 1 – Геометрическая модель в виде сборки для динамического моделирования в системе Autodesk Inventor

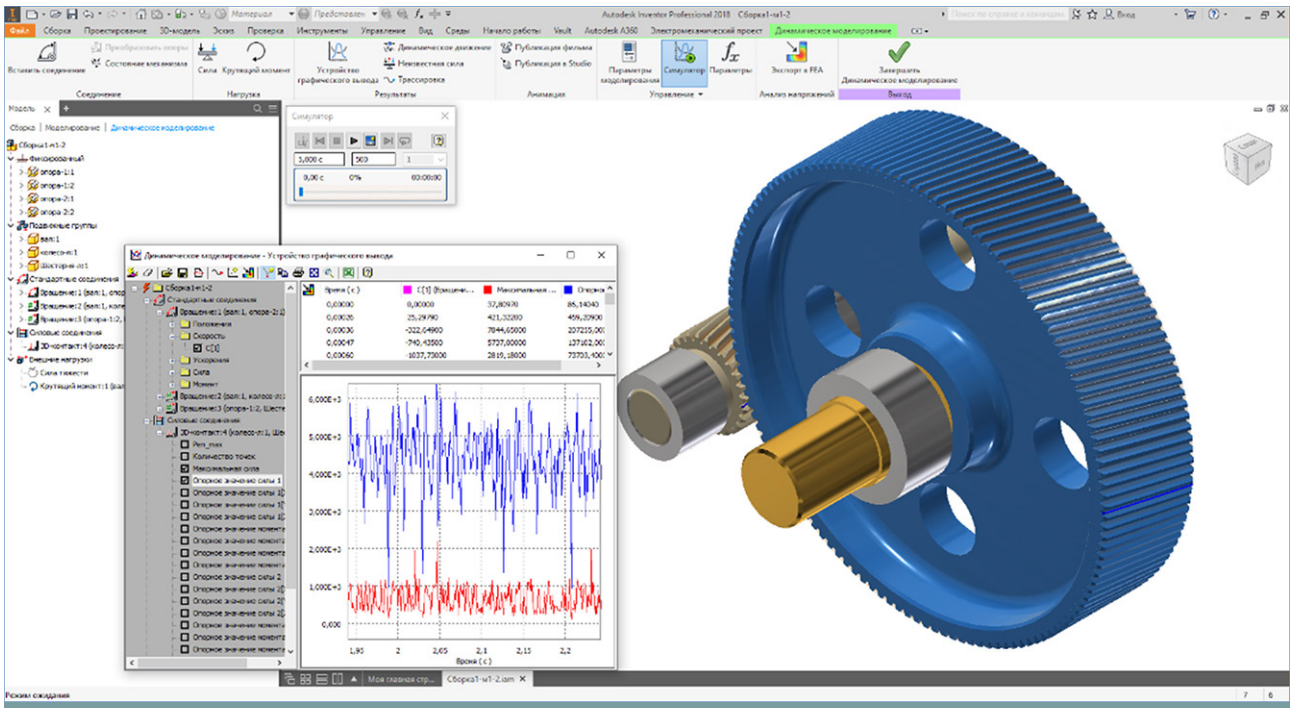

Рисунок 2 – Расчет цилиндрической зубчатой передачи в модуле «Динамическое моделирование»

Среднее значение силы взаимодействия между вал-шестерней и колесом, полученное в ходе компьютерного моделирования, составляет 4527 Н, что незначительно превышает значение (4088 Н [3]), вычисленное по аналитическим формулам, на 10%. Данное превышение можно объяснить тем, что в аналитических расчетах не учитываются динамические нагрузки, вызываемые нелинейным поведением системы. Таким образом, компьютерное моделирование силового взаимодействия в зубчатом зацеплении позволяет определить реальную нагруженность элементов передачи, что может быть использовано для определения путей снижения нагрузок и оптимизации конструктивных параметров.

Заключение

1. Показана целесообразность применения встроенных расчетных модулей CAD-систем, в частности приложения «Валы и механические передачи 2D» системы КОМПАС-3D, для точного воспроизведения сложных геометрических элементов зубчатого зацепления.

2. Разработана методика подготовки расчетной модели цилиндрической зубчатой передачи, обеспечивающая получение результатов компьютерного моделирования динамической работы с приемлемой точностью.

3. Компьютерное моделирование динамической работы цилиндрической зубчатой передачи показало правильность функционирования модели и возможность учета нелинейных эффектов, определяемых условием потери контакта зубьев.

4. Результаты компьютерного моделирования силового взаимодействия в зубчатом зацеплении показывают близкой к реальной нагруженность элементов передачи, которая характеризуется наличием динамических нагрузок, вызываемых нелинейным поведением системы.

5. Рассмотренную методику компьютерного моделирования можно использовать для исследования влияния износа зубьев на работу механической передачи, внося соответствующие изменения на геометрию профиля зуба.

а

б

Рисунок 3 – Графики изменения показателей (а) скорости вращения ведомого звена и (б) силы взаимодействия между вал-шестерней и колесом

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макридина М.Т., Макридин А.А. Детали машин. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2013. 165 с.
2. Основы моделирования зубчатых передач в COMSOL Multiphysics // Блог COMSOL об инженерных разработках и науке. 2016. 7 июля. URL: http://www.bogorodsk-noginsk.ru/forum/ (дата обращения: 20.05.2021).
3. Чернавский С.А. и др. Курсовое проектирование деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 416 с.
4. Роль изучения САПР в формировании проектно-конструкторских компетенций студентов / Ногаев К.А., Зимовец А.В., Моисейкин И.А. // Сборник трудов Республиканской научно-методической конференции «Трансформация образования: содержание, технологии, качество». Темиртау, 2019. С. 287-291.

5. Kishore T. Learn Autodesk Inventor 2018 Basics: 3D Modeling, 2D Graphics, and Assembly Design. Apress, 2017. 399 p.
6. Моделирование динамической работы механизмов / Злобин А. // Рациональное Управление Предприятием. 2010. Вып. 1. С. 26-27.
7. О моделировании динамической работы механизма / Ногаев К.А., Кыдырбаева С.Ж., Сарсенбай А.Е. // Интернаука. 2019. № 19. Часть 2. С. 68-71.
8. Пустовой А.А. Определение жесткости зубчатого колеса методом конечных элементов с использованием рассчетного комплекса АРМ WinMachine // Страница магистров ДонНТУ. 2008. URL: http://masters.donntu.org/2008/mech/pustovoy/ind/index.htm (дата обращения: 20.05.2021).
9. Ориентировочные коэффициенты трения // Основы технологии машиностроения. 2008. URL: http://www.bogorodsknoginsk.ru/forum/ (дата обращения: 20.05.2021).
10. Моделирование нелинейных колебаний цилиндрических зубчатых передач авиационных приводов / Калинин Д.В., Темис Ю.М. // Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. С.П. Королева. Самара, 2010. Том 14. Вып. 3. Часть 1. С. 139-148.

Цилиндрлік тісті берілістің динамикалық жұмысын компьютерлік модельдеу

*[1]**НОГАЕВ Кайрош Абилович,** т.ғ.к., доцент, nk-1912@mail.ru,*
*[1]***АБИШКЕНОВ Максат Жарылгасынович,** магистр, оқытушы, maks91.kz@inbox.ru,*
*[1]**КЫДЫРБАЕВА Салтанат Жайсанбековна,** магистр, оқытушы, t-slastena@mail.ru,*
*[1]**КУЗЬМИН Виктор Сергеевич,** студент, viktorjomik2@gmail.com,*
[1]«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Теміртау, Республика даңғылы, 30,
**автор-корреспондент.*

***Аңдатпа.** Мақалада цилиндрлік тісті берілістің динамикалық жұмысын компьютерлік модельдеу әдістерін қолдану арқылы зерттеу нәтижелері келтірілген. Autodesk Inventor бағдарламасының инженерлік талдау ортасында модельдеуге арналған объектінің геометриялық және есептік моделін дайындау қарастырылған. Компьютерлік модельдеу барысында есептелген модельдің нақты физикалық объектімен сәйкестігі және тістердің жанасуын жоғалту жағдайында анықталған сызықтық емес әсерлерді ескеру мүмкіндігі анықталды. Тісті берілістің күштік әсерлесу мәндері жүйенің сызықтық емес жүріс-тұрысынан туындаған динамикалық жүктемелерді көрсетеді. Берілген компьютерлік модельдеу әдісін жүктемелерді азайту және механикалық берілістердің конструкторлық параметрлерін оңтайландыру тәсілдерін анықтауға пайдалануға болады.*

***Кілт сөздер:** компьютерлік модельдеу, тісті беріліс, Autodesk Inventor, есептеу моделі, динамика, күштік өзара әрекеттесу.*

Computer Simulation of the Dynamic Operation of a Cylindrical Gear

*[1]**NOGAYEV Kairosh,** Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, nk-1912@mail.ru,*
*[1]***ABISHKENOV Maxat,** master, Lecturer, maks91.kz@inbox.ru,*
*[1]**KYDYRBAEVA Saltanat,** master, Lecturer, t-slastena@mail.ru,*
*[1]**KUZMIN Victor,** student, viktorjomik2@gmail.com,*
[1]NCJSC «Karaganda Industrial University», Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30,
**corresponding author.*

***Abstract.** The article presents the results of the study of the dynamic operation of a cylindrical gear transmission using computer simulation methods. The preparation of the geometric and design model of an object for modeling in the engineering analysis environment of the Autodesk Inventor program is considered. In the course of computer modeling, the correspondence of the calculated model to a real physical object and the possibility of taking into account nonlinear effects determined by the condition of loss of contact of the teeth were established. The force interaction values of the gearing reflect the dynamic loads caused by the non-linear behavior of the system. The given method of computer modeling can be used to determine ways to reduce loads and optimize the design parameters of mechanical transmissions.*

***Keywords:** computer modeling, gear, Autodesk Inventor, computational model, dynamics, force interaction.*

REFERENCES

1. Makridina M.T., Makridin A.A. Detali mashin [Machine parts]. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2013. 165 p.
2. Osnovy modelirovanija zubchatyh peredach v COMSOL Multiphysics [Fundamentals of Gear Modeling in COMSOL Multiphysics]. Blog COMSOL ob inzhenernyh razrabotkah i nauke [COMSOL Engineering & Science Blog]. 2016. 7 ijulja. URL: http://www.bogorodsk-noginsk.ru/forum/ (data obrashhenija: 20.05.2021).
3. Chernavskij S.A., et al. Kursovoe proektirovanie detalej mashin [Course design of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 416 p.
4. Nogayev K.A., Zimovec A.V., Moisejkin I.A. Rol' izuchenija SAPR v formirovanii proektno-konstruktorskih kompetencij studentov [The role of CAD study in the formation of design and engineering competencies of students]. Sbornik trudov Respublikanskoj nauchno-metodicheskoj konferencii «Transformacija obrazovanija: soderzhanie, tehnologii, kachestvo» [Proceedings of the Republican Scientific and Methodological Conference «Transformation of Education: Content, Technologies, Quality»]. Temirtau, 2019, pp. 287-291.
5. Kishore T. Learn Autodesk Inventor 2018 Basics: 3D Modeling, 2D Graphics, and Assembly Design. Apress, 2017. 399 p.
6. Zlobin A. Modelirovanie dinamicheskoj raboty mehanizmov [Simulation of the dynamic operation of mechanisms]. Racional'noe Upravlenie Predprijatiem [Rational Enterprise Management]. 2010, no. 1, pp. 26-27.
7. Nogayev K.A., Kydyrbaeva S.Zh., Sarsenbaj A.E. O modelirovanii dinamicheskoj raboty mehanizma [On modeling the dynamic operation of the mechanism]. Internauka. 2019. Issue 19. Vol. 2. pp. 68-71.
8. Pustovoj A.A. Opredelenie zhestkosti zubchatogo kolesa metodom konechnyh jelementov s ispol'zovaniem rasschetnogo kompleksa APM WinMachine [Determination of the gear wheel stiffness by the finite element method using the calculation complex APM WinMachine]. Stranica magistrov DonNTU [DonNTU masters page]. 2008. URL: http://masters.donntu.org/2008/mech/pustovoy/ind/index.htm (data obrashhenija: 20.05.2021).
9. Orientirovochnye kojefficienty trenija [Approximate Coefficients of Friction]. Osnovy tehnologii mashinostroenija [Fundamentals of Mechanical Engineering Technology]. 2008. URL: http://www.bogorodsk-noginsk.ru/forum/ (data obrashhenija: 20.05.2021).
10. Kalinin D.V., Temis Ju.M. Modelirovanie nelinejnyh kolebanij cilindricheskih zubchatyh peredach aviacionnyh privodov [Modeling of nonlinear oscillations of cylindrical gears of aviation drives]. Vestnik Samarskogo gos. ajerokosmicheskogo un-ta im. akad. S.P. Koroleva [Bulletin of the Samara State aerospace univ. them. acad. S.P. Corolev]. Samara, 2010. Issue 14. Vol. 3. No 1. pp. 139-148.