

УДК 621.91.01

**Р. М. Грубка**, канд. техн. наук, доцент  
ГОУ ВПО "Донецкий национальный технический университет", ДНР  
Тел./Факс: +38 (050) 620 23 96; E-mail: tm@fimm.donntu.org

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ И НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ НА БАЗЕ КОМПЛЕКСНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

*В статье изложены основные этапы для реализации комплексного функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода по повышению надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач.*

**Ключевые слова:** цилиндрическая зубчатая передача, надежность, долговечность, нагрузочная способность, погрешности изготовления, погрешности монтажа, деформации

**R. M. Grubka**

## **IMPROVEMENT OF RELIABILITY, DURABILITY AND LOADING CAPACITY OF CYLINDRICAL GEARBOXES ON THE BASIS OF INTEGRATED FUNCTIONALLY-ORIENTED DESIGN-TECHNOLOGICAL APPROACH**

*The article describes the main stages for the implementation of a complex functionally oriented design and technological approach to improve the reliability, durability and load capacity of cylindrical gears.*

**Keywords:** cylindrical gearing, reliability, durability, load capacity, manufacturing errors, installation errors, deformation

### **1. Введение**

Основными путями увеличения надежности, долговечности и нагрузочной способности передач [1] являются: применение современных конструкционных материалов и упрочнение рабочих поверхностей деталей машин, обеспечение высокой точности изготовления и сборки элементов зубчатых передач и совершенствование зубчатого зацепления за счет изменения геометрии профилей зубьев и применения пространственных геометрий боковой поверхности зубьев. Наиболее перспективным из трёх направлений является совершенствование зубчатого зацепления, позволяющее с минимальными затратами из тех же материалов и при той же точности изготовления получить передачу с большей нагрузочной способностью. Создание высоконагруженных передач зацепления связано с нахождением геометрии рабочих поверхностей, обеспечивающей высокие значения критериев работоспособности [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Задача повышения нагрузочной способности и долговечности зубчатых передач может быть отнесена к проблеме многокритериальной оптимизации машиностроительных конструкций [9, 10]. Основные положения системы оптимизационного синтеза профилей зубьев цилиндрических передач представлены в работе [1]. Известна система комплексного обеспечения точности зубчатых колес (КОТЗК) [11], которая представляет собой комплексную многоуровневую систему с вертикальными и горизонтальными связями и предназначена для реализации в условиях автоматизированного производства. Исследования, проведенные автором [12] о наличии связи кинематической погрешности в квазистатических условиях с ее проявлением в динамике позволили установить, что при эксплуатации зубчатых колес их точность снижается. Поэтому система

направлена на отыскание конструкторско-технологических методов управления точностью, снижающих динамические проявления кинематической погрешности.

Синтез зубчатых передач различных классов, типов и видов должен осуществляться с учетом их жизненного цикла. При этом важными этапами жизненного цикла зубчатых передач являются взаимосвязанные рекуррентные процессы их теоретического и технологического формообразования [13, 14, 15, 16, 17].

Изложенные подходы к синтезу зубчатых передач основываются в основном на стандартных методиках теоретического и/или технологического синтеза применяемых для некоторых этапов жизненного цикла зубчатых передач или связывающих некоторые этапы их жизненного цикла. Существующие пакеты синтеза зубчатых зацеплений значительно ограничены ГОСТами, стандартными методиками расчета, известными классификациями, известными способами теоретического и технологического синтеза, способами обработки, техническими средствами обработки и контроля, точностью сборки, условиями эксплуатации, способами ремонта и т.д. Рассмотренные системы в полной мере не позволяют при синтезе зубчатых соединений и производстве элементов зубчатых передач учесть погрешности изготовления, погрешности монтажа, а так же перемещения, вызванные деформациями, которые возникают в процессе эксплуатации. Системы синтеза и оптимизации цилиндрических зубчатых колес и передач направлены на решение какой либо одной частной задачи или нескольких частных задач синтеза того или иного зубчатого соединения или оптимизацию по одному или нескольким критериям, при этом зачастую в отрыве от реальных процессов формообразования. Как следствие полученная в процессе изготовления геометрия боковой поверхности зубьев может отличаться от теоретической оптимальной геометрии.

В настоящее время сложилось три подхода к проектированию зубчатых передач [18]: технологический, конструктивный и конструктивно-технологический. Применение того или иного подхода на практике, в условиях конкретного производства, зависит от множества факторов. Использование исходного производящего контура (ИПК), свойственное технологическому подходу, приводит к ограничению функциональных возможностей зубчатых передач при возможности нарезания зубчатых венцов стандартным режущим инструментом. Отказ от использования ИПК, свойственное конструктивному подходу, способствует расширению функциональных возможностей зубчатых передач, но приводит к снижению их технологичности и ограничению по применению в крупносерийном и массовом производствах.

Развитие конструктивно-технологического подхода для проектирования и производства цилиндрических зубчатых передач с учетом погрешностей изготовления и монтажа зубчатых венцов, а также перемещений элементов зубчатых передач, вызванных деформациями, возникающими в процессе эксплуатации, наряду с использованием стандартного или нестандартного ИПК для формообразования зубчатых венцов должно привести к повышению их надежности, долговечности и нагрузочной способности. Учет всех составляющих погрешностей и деформаций при синтезе геометрий боковой поверхности зубьев позволяет обеспечить требуемые функциональные свойства зубчатых колес и передач, а гибкий выбор вида ИПК позволит расширить технологические возможности существующих или проектируемых производств. Совместное решение, в рамках одной системы, конструкторских и технологических задач позволит обеспечить соответствие эксплуатационных функций зубчатых колес и передач на их основе тем технологическим воздействиям, которые позволят получить заданное качество изделий с зубчатыми венцами при требуемом объеме их выпуска.

**Цель работы:** разработка комплексного функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач, которые эксплуатируются в условиях наличия погрешностей изготовления, погрешностей монтажа и деформаций элементов зубчатых передач под рабочей нагрузкой.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Рассмотрим комплексный функционально-ориентированный конструкторско-технологический подход по повышению надежности, долговечности и нагрузочной способности при проектировании и изготовлении цилиндрических зубчатых передач (рис. 1.). Данный подход предполагает выполнение нескольких этапов в рамках жизненного цикла изделий с цилиндрическими зубчатыми колесами и передачами.

На первом этапе выполняется изучение и уточнение технических и эксплуатационных требований, предъявляемых к узлам с цилиндрическим зубчатыми колесами (ЗК) и зубчатыми передачами (ЗП). К техническим требованиям относятся: передаваемая мощность, окружная скорость, режим работы и т.д. К эксплуатационным требованиям можно отнести: назначение передачи, предельные габаритные размеры, требования по долговечности и надежности передачи. На основании технических и эксплуатационных требований к ЗК и ЗП определяются их геометрические параметры: число зубьев, ширина зубчатых венцов, модуль, межосевое расстояние, вид и глубина модификации боковой поверхности зубьев и т.д.

На втором этапе определяется точность изготовления и сборки элементов ЗК и ЗП (степени точности колес, посадки для всех соединений, точность выполнения основных отверстий и т.д.), устанавливаются требования к состоянию поверхностного слоя рабочих поверхностей деталей, в том числе и боковой поверхности зубьев.

Третий этап заключается в определении предельных или вероятных погрешностей изготовления и монтажа, а также перемещений, вызванных деформациями элементов изделий с цилиндрическими зубчатыми колесами (зубьев, ободов зубчатых венцов, валов, элементов подшипников, корпусов и т.д.).

Данные полученные на первых трех этапах являются исходными данными для последующего синтеза конструкции ЗК и ЗП, в том числе и для синтеза геометрии боковой поверхности зубьев, а так же для синтеза структуры технологического процесса изготовления ЗК и сборки передач на их основе.

После определения всех составляющих элементарных погрешностей и деформаций элементов деталей на четвертом этапе определяют суммарные величины погрешностей: три суммарных перемещения и два суммарных поворота относительно координатных осей абсолютной системы координат.

На пятом этапе выполняют синтез геометрии боковой поверхности зубьев с учетом рассчитанных суммарных погрешностей изготовления и монтажа элементов ЗП и величин их деформаций под действием рабочей нагрузки. Синтез выполняется с учетом обеспечения заданного характера контактирования зубьев (точечный, линейный или квазилинейный контакт зубьев), обеспечение двух и многопарного зацепления, с возможностью управления жесткостью элементов зубчатых венцов и возможностью компенсации переменных монтажных погрешностей или погрешностей вызванных деформацией элементов ЗП во время эксплуатации. Управление жесткостью элементов зубчатого венца способствует обеспечению заданной полноты контакта в зубчатом соединении.

Синтез боковой поверхности зубьев также может осуществляться с учетом достижения предельных или оптимальных значений эксплуатационных характеристик зубчатых колес и зубчатых передач (контактная прочность рабочих поверхностей зубьев, изгибная прочность зубьев, теплостойкость передачи, износ рабочих поверхностей, толщина масляного слоя, потери в зацеплении и т.д.).

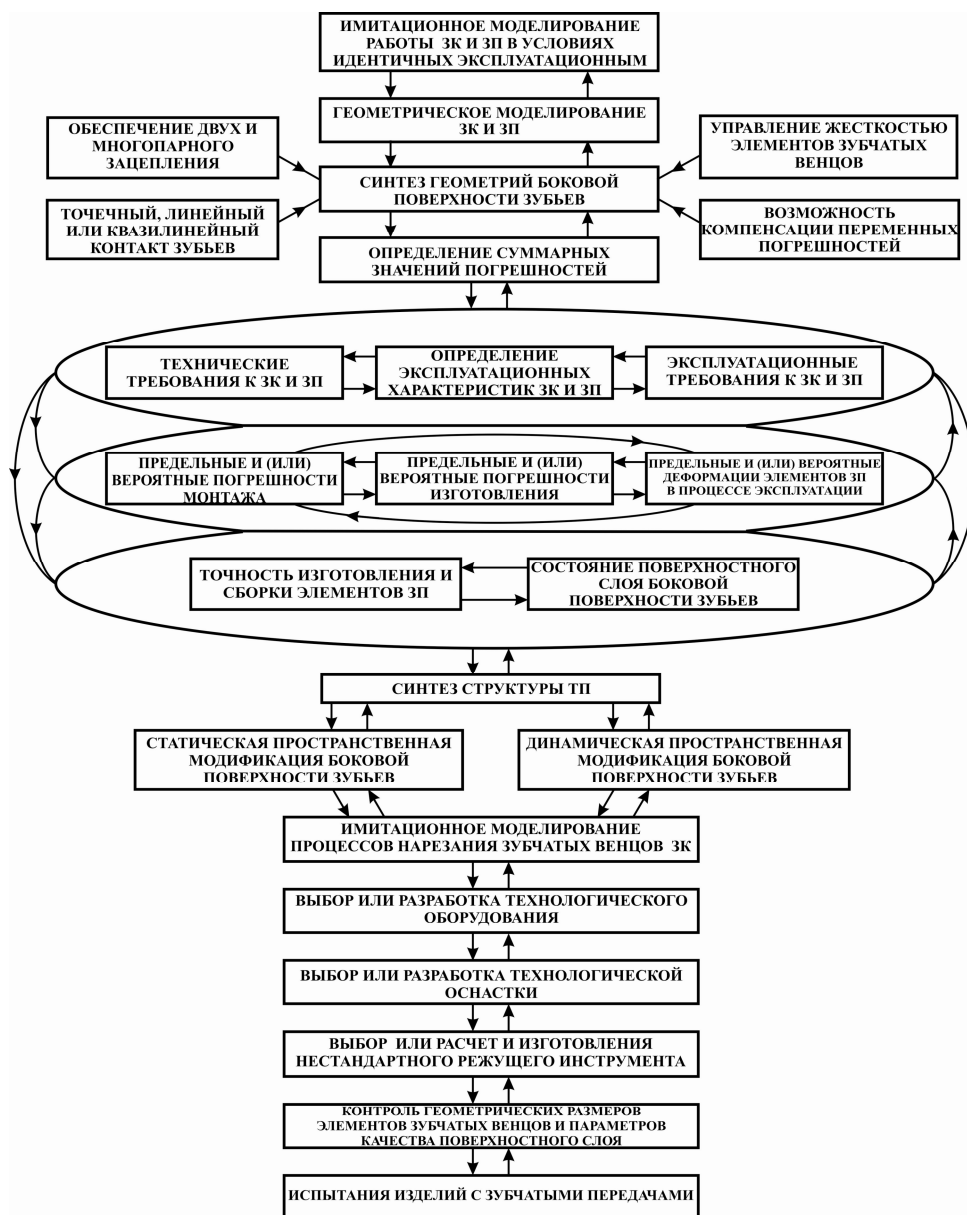


Рисунок 1. Комплексный функционально-ориентированный конструкторско-технологический подход повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач

На следующем - шестом этапе выполняется расчет и уточнение эксплуатационных характеристик ЗК и ЗП с учетом влияния погрешностей изготовления, погрешностей монтажа и перемещений, вызванных деформациями элементов изделий с цилиндрическими зубчатыми колесами.

При достижении показателей удовлетворяющих техническим и эксплуатационным требованиям, предъявляемым к ЗК и ЗП, выполняется седьмой этап, который предполагает геометрическое моделирование ЗК и ЗП средствами САД (Computer Aided Design) программ. Для выполнения этого этапа необходимо представить полученные при синтезе геометрии боковой поверхности зависимости в виде, позволяющем выполнять автоматизированное проектирование геометрии боковой поверхности средствами САД. Например, задав геометрию боковой поверхности зубьев в табличном виде или аппроксимировав сечения боковой поверхности зубьев сплайнами или другими зависимостями в сечениях ортогональных оси вращения зубчатых колес и в сечениях плоскостями касательными к концентричным цилиндрическим поверхностям. Собственно, после чего и осуществляется построение 3D-модели цилиндрических зубчатых колес, передач и узлов с ними в полуавтоматическом или автоматическом режимах.

Полученные на седьмом этапе 3D-модели цилиндрических зубчатых колес, передач и узлов позволяют перейти к выполнению восьмого этапа – имитационному моделированию работы ЗК и ЗП в условиях идентичных к эксплуатационным средствами САЕ (Computer Aided Engineering) программ. Имитационное моделирование работы ЗК и ЗП средствами САЕ программ позволяет выполнить проверку работоспособности деталей и узлов под действием эксплуатационных нагрузок, определить характеристики передачи, а при необходимости выполнить одно или многокритериальную оптимизацию их конструкции.

При не соответствии эксплуатационных характеристик, определенных в ходе выполнения шестого этапа, требованиям, предъявляемым к ЗК и ЗП, повторяют этапы со второго по пятый. И путем изменения точности изготовления и сборки элементов ЗК и ЗП, выполняют изменение предельных или вероятных погрешностей изготовления и монтажа, а также деформации элементов изделий с цилиндрическими зубчатыми колесами. После чего уточняются суммарные величины погрешностей ЗК и ЗП, и проводится синтез геометрии боковой поверхности зубьев. Для спрофилированных зубьев рассчитываются эксплуатационные характеристики, проводится геометрическое моделирование и выполняется проверочное имитационное моделирование работы ЗК и ЗП в средствами САЕ программ. Добившись, таким образом, требуемых эксплуатационных характеристик и проверив работоспособность и нагрузочную способность передач средствами САЕ программ, выполняются сборочные и рабочие чертежи деталей, узлов и изделия в целом. На этом завершается этап конструкторской подготовки производства жизненного цикла изделий с цилиндрическими зубчатыми колесами.

На девятом этапе выполняется синтез структуры технологических процессов (ТП) изготовления элементов ЗП и сборки узлов и агрегатов с ЗК. Исходными данными для выполнения этого этапа являются требования по точности, предъявляемые к элементам ЗК и ЗП в процессе их изготовления и сборки, требования по качеству поверхностного слоя взаимодействующих поверхностей, структура геометрии боковой поверхности зубьев, полученная в результате синтеза геометрий и аппроксимации боковой поверхности зависимостями различного вида. Структура технологических процессов может быть различна в зависимости от конкретных производственных условий и должна разрабатываться на основе традиционных, комбинированных и новых технологий и схем формообразования элементов ЗК и элементов ЗП. Комплексный функционально-ориентированный конструкторско-технологический подход проектирования и изготовления цилиндрических зубчатых колес и передач предполагает на этапах их конструирования и изготовления постановку в соответствие геометрических параметров, эксплуатационных функций и характеристик цилиндрических ЗК и ЗП на их осно-

ве, технологическим воздействиям, которые необходимо осуществить для получения заданной геометрии боковой поверхности зубьев и обеспечения искомых точности и качества рабочих поверхностей, функций и характеристик ЗК и ЗП (рис. 2). В результате выполнения данного этапа могут быть разработаны единичные, групповые, типовые и др. ТП. А для реальных производственных условий разрабатываются МТП и (или) ОТП и выполняется формирование комплекта технологической документации. Разработка ТП должна вестись с применением имеющихся на производстве САПР ТП.

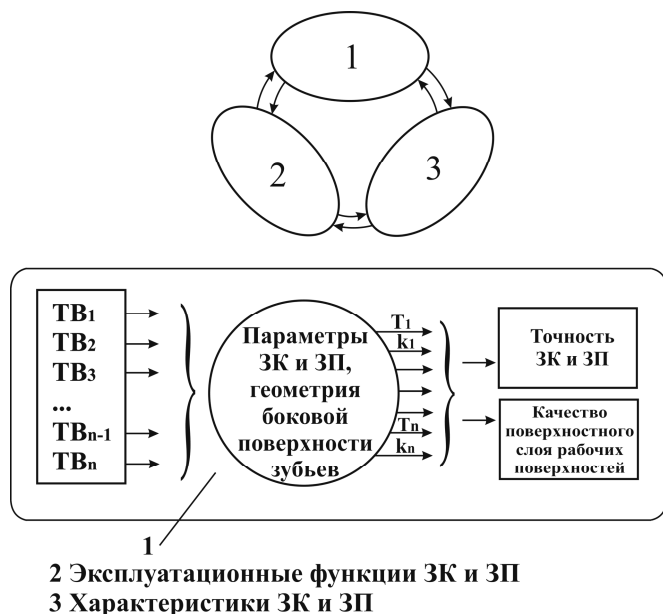


Рисунок 2. Структурная схема соответствия геометрических параметров, эксплуатационных функций и характеристик цилиндрических зубчатых колес и зубчатых передач на их основе, технологическим воздействиям

странственной. Таким образом, на десятом этапе рассчитываются траектории относительных движений инструмента и заготовки для всех операций, разработанного на девятом этапе ТП изготовления венцов цилиндрических зубчатых колес с пространственными геометриями боковой поверхности зубьев.

На одиннадцатом этапе производится выбор технологического оборудования для осуществления операций разработанного ТП. Для вновь спроектированных операций осуществляется проектирование нестандартного технологического оборудования или элементов подналадки или переналадки станков (кулачков и т.д.).

На двенадцатом этапе производится выбор или разработка технологической оснастки.

На тринадцатом этапе производится выбор стандартного или расчет и изготовление нестандартного режущего инструмента для осуществления разработанных операций ТП. Так же на этом этапе назначаются режимы резания формообразующих движений и движений подачи.

Четырнадцатый этап заключается в имитационном моделировании ТП нарезания зубчатых венцов ЗК средствами САЕ программ. Имитационное моделирование может быть особенно актуально при разработке новых ТП, режущего инструмента и

Обработка зубчатых венцов может вестись с постоянными режимными параметрами и с переменными во времени. Таким образом, различается статическая и динамическая модификация боковой поверхности зубьев. Статическая модификация боковой поверхности зубьев выполняется при неизменных во времени эксплуатационных условиях. Динамическая модификация боковой поверхности зубьев выполняется при переменных во времени эксплуатационных условиях или для компенсации погрешностей различного вида входящих в некоторый интервал значений.

Применяя стандартный режущий инструмент и существующее серийное оборудование могут быть получены зубчатые венцы с геометрией боковой поверхности зубьев приближенной к заданной статической или динамической про-

технологической оснастки. Имитационное моделирование позволяет получить комплекс данных для проведения качественной и количественной оценки эффективности применения конструкторских и технологических решений.

Таким образом, завершается этап технологической подготовки производства изделий с цилиндрическими зубчатыми колесами.

На пятнадцатом этапе собственно осуществляется производство изделий с цилиндрическими зубчатыми колесами.

На шестнадцатом этапе выполняется контроль геометрических размеров элементов зубчатых венцов и параметров качества поверхностного слоя их рабочих поверхностей. По результатам контроля могут быть внесены коррективы в разработанный ТП, после чего может возникнуть необходимость полностью или частично повторять этапы с девятого по пятнадцатый.

Семнадцатый этап подразумевает выполнение испытаний изделий с зубчатыми передачами. На этом завершается этап производства и продукция передается заказчику.

Следующий этап жизненного цикла (на рис 1. не показан) предполагает эксплуатацию изделий с ЗП, а также весь комплекс мероприятий позволяющий поддерживать их в работоспособном состоянии (техническое обслуживание, система планово-предупредительных и капитальных ремонтов). Планирование операций по восстановлению и ремонту изделий с зубчатыми колесами может осуществляться в соответствии с описанным ранее алгоритмом, минуя этапы синтеза геометрии боковой поверхности зубьев. Данные о процессах, происходящих с ЗК и ЗП в процессе эксплуатации, могут быть использованы на всех этапах их конструкторского и технологического проектирования и производства для совершенствования, как самих расчетных алгоритмов, так и изделий в целом.

### 3. Выводы

Таким образом, разработан комплексный функционально-ориентированный конструкторско-технологический подход повышения надежности, долговечности и грузочной способности цилиндрических зубчатых передач, который позволяет осуществлять как сквозное, так и итерационное проектирование цилиндрических зубчатых колес с пространственной геометрией боковой поверхности зубьев, способных компенсировать все погрешности изготовления и монтажа элементов зубчатых передач, а также перемещения, вызванные деформациями элементов передач, возникающими в процессе эксплуатации под действием рабочей нагрузки. Выполнение этапов изложенных в данной работе позволяет поддерживать заданный уровень качества зубчатых передач в течении всего времени их производства, совершенствовать зубчатые передачи с учетом данных полученных в процессе их производства и эксплуатации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабичев, Д. Т. Основы концепции синтеза рабочих поверхностей зубьев цилиндрических передач, обладающих заданной контактной прочностью / Д. Т. Бабичев, М. Г. Сторчак, Д. А. Бабичев // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2012. – № 2. – С. 150 - 160.
2. Litvin, F. L. Gear Geometry and Applied Theory, Prentice Hall, 1994. – 832 p.
3. Ерихов, М. Л. Принципы статистики, методы анализа и вопросы синтеза зубчатых зацеплений: Дисс. докт.техн.наук. – Хабаровск, 1972. – 324с.
4. Вулгаков, Э. Б. Теория эвольвентных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1995. – 264с.

5. Шевелева, Г. И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. – М.: Изд-во "Станкин", 1999. – 494с.
6. Муховатый, А. А. Метод синтеза высоконагруженных зубчатых передач / А. А. Муховатый // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы механического привода. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2011. – № 29. – С. 100-107.
7. Шишов, В. П., Носко, П. Л., Филь, П. В. Теоретические основы синтеза передач зацеплением. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2006. – 408с.
8. Павлов, А. И. Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – 100с.
9. Щекин, Б. М. Моделирование и оптимизация зубчатых передач // Вестник машиностроения. – 1987. – №1. – С. 7 – 9.
10. Заблонский, К. И. Зубчатые передачи: Распределение нагрузки в зацеплении / К. И. Заблонский. – Київ: Техніка, 1977. – 207 с.
11. Артемов, И. И. Система комплексного обеспечения точности зубчатых колес в условиях автоматизированного производства // СТИН. – 1998. – №6. – С. 8 - 13.
12. Марков, Н. Н. Проявление кинематической погрешности зубчатых колес под действием нагрузок и скоростей вращения / Н. Н. Марков, И. И. Артемов // Вестник машиностроения. – 1986. – №3. – С. 21 - 23.
13. Кривошея, А. В. К вопросу классификации кинематических схем и математических моделей формообразования зубчатых передач / А. В. Кривошея, Ю. М. Данильченко, М. Г. Сторчак, Д. Т. Бабичев, В. Е. Мельник, В. И. Французов, Ю. Г. Гуцаленко, Т. Е. Третьяк // Вісник НТУ "ХП", 2014. – № 31 (1074) – С. 75 - 84.
14. Кривошея, А. В. Обобщённая классификация кинематических схем формообразования зубчатых колес / А. В. Кривошея, М. Г. Сторчак, Ю. М. Данильченко, В. В. Кривошея // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХП", 2006. – Вип. 2(13). – С. 48-69.
15. Кривошея, А. В. Совершенствование обобщённой унифицированной математической модели формообразования и обработки зубчатых колес / А. В. Кривошея, Ю. М. Данильченко, М. Г. Сторчак, В. Е. Мельник // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия Металлообработка. – 2010. – №4. – С. 46-51.
16. Данильченко, Ю. М. Проектирование формообразующего оборудования и инструментальных систем для обработки зубчатых колес / Ю. М. Данильченко, А. В. Кривошея, М. Г. Сторчак // Международный симпозиум "Теория и практика зубчатых передач-2014". – Ижевск, 20-21 января 2014. – С. 484-489.
17. Кривошея, А. В. Разработка концепции, структуры и принципов создания и функционирования новой технической системы синтеза зубчатых передач / А. В. Кривошея, М. Г. Сторчак, Ю. М. Данильченко, Н. Э. Тернюк, Б. С. Воронцов, А. В. Устиненко // Вісник НТУ "ХП". – 2015. – № 34 (1143). – С. 64 – 74.
18. Петровский, А. Н. К задаче оптимизации параметров эвольвентного зацепления / А. Н. Петровский // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева – Нижний Новгород, 2011. – №2(87). – С. 75 - 87.

Поступила в редколлегию 13.04.2018 г.