

А.В. КРИВОШЕЯ, к.т.н., старший научный сотрудник ИСМ НАН Украины, Киев;
М.Г. СТОРЧАК, д.т.н., научный сотрудник ИСИ ШУ, Штутгарт, Германия;
Ю.М. ДАНИЛЬЧЕНКО, д.т.н., проф., зав. кафедрой ПМ НТУ "КПИ", Киев;
Н.Э. ТЕРНЮК, д.т.н., проф., президент международной академии наук и инновационных технологий, Киев;
Б.С. ВОРОНЦОВ, к.т.н., доц., зав. кафедрой ТМ ВНУ им. В. Даля, Северодонецк;
А.В. УСТИНЕНКО, к.т.н., с.н.с., доцент каф. ТММ и САПР НТУ "ХПИ"

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ, СТРУКТУРЫ И ПРИНЦИПОВ СОЗДАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

В статье обоснована необходимость, техническая и экономическая целесообразность создания новой технической системы синтеза зубчатых передач и ее поддерживающих математических моделей и информационных технологий с учетом жизненного цикла зубчатых передач. Представлена структура технической системы, концепция, принципы создания и функционирования. Рассмотренная система позволит синтезировать зубчатые передачи с более высокими качественными показателями и обеспечить валидацию всех этапов ее жизненного цикла.

Ключевые слова: зубчатая передача, синтез, концепция, структура, принципы создания, жизненный цикл.

Постановка проблемы. В настоящее время в отечественной промышленности распространяются новые информационные технологии сквозной поддержки сложной наукоемкой продукции на всех этапах ее жизненного цикла, в т.ч.: на этапах технического замысла, проектирования, производства, продажи, эксплуатации, сервисного обслуживания, ремонта и утилизации в рамках единой технической системы. Такая стратегия систематического повышения эффективности, производительности и рентабельности процессов хозяйственной деятельности предприятия, а также объединения современных методов информационного взаимодействия этапов жизненного цикла продукции называется CALS-технологиями (Continuous Acquisition and Life-cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукта).

Эти технологии позволяют существенно снизить трудоемкость проектирования, производства, продажи, эксплуатации, сервисного обслуживания и ремонта сложного оборудования и повысить производительность труда на многих этапах жизненного цикла, как минимум, на 30% [1].

В то же время, эти информационные технологии сквозной поддержки этапов жизненного цикла продукции можно использовать не только для повышения эффективности, производительности и рентабельности процессов хозяйственной деятельности предприятия, но и для создания новых механизмов или радикального совершенствования известных, с применением наукоемких процессов, расширения области существования этапов жизненного цикла изделий, обобщающих математических моделей, информационных технологий, современных технических средств [2].

Проблематичность разработки общей теории создания новой техники в машиностроении определяется тем, что все этапы ее разработки, производства

© А.В. Кривошея, М.Г. Сторчак, Ю.М. Данильченко, Н.Э. Тернюк, Б.С. Воронцов, А.В. Устиненко, 2015

и эксплуатации характеризуются многогранностью, масштабностью, сложностью, многовариантностью, недостаточной определенностью и, как следствие, слабой формализуемостью.

В данной статье мы представляем особенности разработки такой технической системы и информационной технологии ее поддержки на примере синтеза зубчатых передач, как одной из массовых и наиболее сложных высших кинематических пар.

Многообразие различных классов, типов и видов зубчатых передач, расширение сфер применения и предназначения, необходимость повышения функциональных, эксплуатационных, энергетических, экономических, экологических (шум и вибрации) и массогабаритных показателей требует разработки более совершенных подходов к созданию технических систем их синтеза и информационных технологий поддержки этапов их жизненного цикла.

Поэтому создание новой технической системы синтеза зубчатых передач различных классов, типов и видов с учетом их жизненного цикла и с использованием наукоемких процессов, более совершенных математических моделей и информационных технологий их поддержки является актуальной задачей отечественного машиностроения.

Целью данной статьи является разработка концепции, структуры, принципов создания, функционирования новой технической системы синтеза зубчатых передач и информационных технологий поддержки этапов их жизненного цикла.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих технических систем синтеза зубчатых передач и информационных технологий их поддержки.
2. Определить концепцию новой технической системы синтеза зубчатых передач.
3. Установить основные принципы создания и функционирования технической системы синтеза зубчатых передач и информационных технологий поддержки этапов их жизненного цикла.
4. Уточнить структуру обобщенной технической системы синтеза зубчатых передач, т.е. основные этапы ее жизненного цикла и их особенности.
5. Установить прямые и обратные связи между этапами жизненного цикла зубчатых передач и уточнить особенности функционирования отдельных этапов и всей системы в целом.
6. Привести примеры обобщенных математических моделей некоторых этапов жизненного цикла.
7. Определить стратегию дальнейших исследований.

Для создания новой технической системы синтеза зубчатых передач и информационных технологий поддержки этапов ее жизненного цикла необходимо проанализировать существующие системы синтеза зубчатых передач, определить основную концепцию, структуру и принципы создания и функционирования новой технической системы синтеза, а также информационных технологий поддержки этапов ее жизненного цикла.

В настоящее время нам неизвестны технические системы синтеза зубчатых зацеплений, описывающие взаимодействие всех этапов жизненного цикла зубчатых передач и их поддерживающих информационных технологий. Суще-

ствующие информационные технологии синтеза зубчатых передач основываются в основном на стандартных методиках теоретического и технологического синтеза применяемых для некоторых этапов жизненного цикла отдельных классов, типов и видов зубчатых передач или связывающих некоторые этапы их жизненного цикла. Существующие пакеты синтеза некоторых этапов жизненного цикла зубчатых передач 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.

Есть лишь системы, созданные фирмами, производящими зубообрабатывающие станки: "LTCA" фирмы Gleason, "KIMOS" фирмы Klingelnberg, саратовская "ВОЛГА-5" (здесь лишь о системах, являющихся программными продуктами). Отсутствие CALS-технологий для синтеза зубчатых передач объясняется, вероятнее всего, не только отсутствием финансирования или математической и логической сложностью. Причина усматривается еще и в том, что области поиска оптимальных вариантов синтеза крайне ограничены, а методы и математические модели теории зацеплений не всегда отвечают требованиям, предъявляемым к ним заказчиками и разработчиками программного обеспечения.

Существующие информационные технологии (Catia, Unigraphics, ProEngineer, PowerSOLUTION, SolidWorks, Sprut, Компас, T-FLEX и др.) используемые на этапах проектирования и производства различных машин и механизмов, а также системы:

- CAE (Computer Aided Engineering) – системы автоматизированного инженерного анализа деталей и машин (Nastran, Ansys, Compas и др.);
- PDM (Product Data Management) – системы автоматизированного управления базами данных об изделии (IMAN, Optegra, Enivia и др.);
- Project Management – автоматизированные системы управления процессом проектирования и системы планирования (WorkFlow, DocFlow и Project Planing);
- MRP (Material Requirements Planning) – автоматизированные системы управления производством (SAP R/3, BAAN, Галактика и др.);
- CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) – системы автоматизированного проектирование изделий не удовлетворяют в полной мере задачи синтеза зубчатых зацеплений в нашей постановке.

Все эти информационные технологии конечно можно использовать для совершенствования некоторых этапов жизненного цикла зубчатых передач, однако они рассчитаны на широкий класс деталей и не учитывают многие особенности жизненного цикла и синтеза зубчатых передач.

В то же время развитие теории технических систем, достижение отечественных и зарубежных ученых в области задания, редактирования или модификации поверхностей зубчатых передач, теории зацеплений, геометро-кинематического синтеза, формообразования поверхностей резанием, технологии изготовления, сборки, условий эксплуатации, расчетов изгибной и контактной прочности и долговечности, динамики зубчатых передач, расчетов на "горячее" и "холодное" заедание, достижения современного материаловедения, в том числе в области сверхтвердых материалов, современный математический аппарат (теория отображения аффинного пространства, теория множеств, булева алгебра), современные компьютерные системы, станочное обо-

рудование и измерительная техника позволяют нам приступить к разработке новой технической системы жизненного цикла зубчатых передач и непрерывной информационной поддержки этапов ее жизненного цикла. Весь этот комплекс накопленных знаний, достижений науки, наукоемких процессов и современных технических средств позволяет значительно расширить область поиска оптимальных этапов жизненного цикла зубчатой передачи и реализовать его оптимальный вариант.

Для создания такой системы и информационных технологий необходимо объединить усилия многих отечественных и зарубежных ученых, программистов, а для ее функционирования необходимы обученные высококвалифицированные специалисты и современные технические средства, обладающие необходимым ресурсом.

Вопросы расчета и проектирования, задания, математического описания, формообразования, геометро-кинематического синтеза, и обработки зубчатых передач и деталей рассматривались в работах Ф.Л. Литвина, М.Л. Ерихова, Н.И. Колчина, Г.А. Шевелёвой, В.П. Шишова, Э.Б. Вулгакова, П.Р. Родина, С.И. Лашнева, М.И. Юликова, Г.И. Грановского, Ю.В. Цвиса, Б.А. Перепелицы, Д.Т. Бабичева, В.С. Люкшина, С.П. Радзевича, Н.Э. Тернюка, Д.Н. Решетова, В.Т. Портмана, М.Г. Сегала, С.Н. Калашникова, Б.А. Тайца, М.Д. Генкина, К.И. Заблонского, А.Ф. Кириченко, В.Л. Устиненко, А.И. Павлова и др. ученых [3-25].

К первым системам синтеза зубчатых зацеплений следует отнести системы геометро-кинематического синтеза. Так Ф.Л. Литвин перечисляет 7 возможных способов геометро-кинематического синтеза зубчатых зацеплений [3]. Более широкие возможности синтеза зубчатых передач различных классов, типов и видов представил М.Л.Ерихов [4]. Существуют системы синтеза зубчатых зацеплений по качественным показателям с использованием блокирующих контуров. Интересные системы геометрического синтеза представлены Г.И. Шевелевой [6], В.П. Шишовым [7], А.И. Павловым [25].

Следует признать, что одна из современных систем теоретического синтеза эвольвентных зубчатых передач, предложенная проф. Э.Б. Вулгаковым [8]. Он разделяет геометрию зубчатого венца на два фрагмента, каждый из которых состоит из объединенных отсеков различных поверхностей – на фрагмент, не зависящий от технологии и фрагмент, зависящий от технологии. Фрагмент, не зависящий от технологии – это номинальный фрагмент главной боковой поверхности и фрагмент, зависящий от технологии – это фрагмент, включающий часть отсека главной боковой поверхности, отсек переходной поверхности впадин и отсек поверхности впадин. В результате анализа формообразования множеством исходных формообразующих контуров определяется оптимальный фрагмент поверхности зубчатого венца и уточняется часть отсека главной боковой поверхности, примыкающей к граничной линии профиля, отсек переходной поверхности впадин и отсек поверхности впадин. Он связывает технологию теоретического и технологического формообразования, однако эта связь далека от реальной технологии изготовления зубчатой передачи.

Одной из систем синтеза является формообразующее производящая система зубчатых зацеплений, включающая теоретическое и технологическое формообразование [26]. Теоретическое формообразование является особенностью проектирования зубчатых передач. Это объясняется тем, что при задании оптимальной формы главной боковой поверхности имеется множество вариантов задания переходной поверхности впадин и поверхности впадин, которые

проще задавать исходным формообразующим телом, которое является прототипом зубообрабатывающих инструментов.

Однако реальное технологическое формообразование осуществляется группой последовательно работающих инструментов и процессов [26].

В общем случае функция инструмента при зубообработке не только удалить необходимый объем металла с обеспечением величины припуска под последующую операцию, но и обеспечить необходимую форму припуска и состояние поверхностного слоя и, прежде всего, точность формы и размеров.

Анализ существующих систем синтеза зубчатых зацеплений показывает, что хотя эти системы и их поддерживающие математические модели и информационные технологии охватывают решение задач синтеза некоторых этапов жизненного цикла отдельных классов, типов и видов зубчатых передач, однако они крайне ограничены из-за использования несовершенных классификаций зубчатых передач, традиционных технологий изготовления, сборки, эксплуатации и ремонта, т.е. эти системы не являются обобщенными и не представляют единую техническую систему синтеза с учетом всего жизненного цикла зубчатых передач.

Так, например, геометро-кинематический синтез не учитывает все особенности реальной технологии изготовления зубчатой передачи, условий ее монтажа и эксплуатации.

Поэтому, для разработки концепции создания новой технической системы синтеза зубчатых передач и ее поддерживающих информационных технологий, необходимо, чтобы эта концепция способствовала созданию новых зубчатых передач, новых технологий изготовления, сборки, эксплуатации и ремонта или совершенствованию известных, с высокими эксплуатационными и др. показателями, а обеспечение глобального синтеза, т.е. синтеза всей технической системы, обеспечило валидацию всех этапах жизненного цикла.

Все вышеприведенное дает основание установить техническую и экономическую целесообразность создания новой технической системы синтеза зубчатых передач и ее поддерживающих математических моделей и информационных технологий, а также сформулировать основную концепцию ее создания и функционирования.

Основная концепция создания новой технической системы синтеза зубчатых передач, включающей информационные технологии ее поддержки – это концепция расширения сфер применения и назначения, повышения функциональных, экономических, энергетических, экологических, эксплуатационных и снижения массогабаритных показателей зубчатых передач путем последовательного анализа и синтеза всех этапов жизненного цикла зубчатой передачи и рекуррентного (возвратного) приближения к оптимальному варианту синтеза по одному или нескольким показателям (или по обобщающему показателю) при ограничении по остальным показателям и обеспечении валидации все этапов жизненного цикла зубчатой передачи.

Валидация – это процедура, дающая высокую степень уверенности в том, что конкретный процесс, метод или система будет последовательно приводить к результатам, отвечающим заранее установленным критериям приемлемости; в частности, валидация технологических процессов проводится с использованием образцов не менее трех серий реального товара с целью доказательства и предоставления документального свидетельства, что процесс (в пределах установлен-

ных параметров) обладает повторяемостью и приводит к ожидаемым результатам при производстве полупродукта или готового товара требуемого качества.

Однако достижение концепции новой технической системы синтеза зубчатых передач и информационных технологий ее поддержки должно обеспечиваться принципами ее создания, функционирования, анализа и синтеза.

Концепция, поставленные задачи, анализ существующих систем синтеза зубчатых передач позволяют определить основные принципы создания новой технической системы синтеза зубчатых передач и информационных технологий поддержки этапов ее жизненного цикла.

Принципы создания, функционирования, анализа и синтеза новой технической системы синтеза зубчатых зацеплений включающей информационные технологии поддержки этапов ее жизненного цикла можно сформулировать следующим образом:

- принцип обобщения;
- принцип открытости и развития технической системы;
- принцип современности методики и математического аппарата;
- принцип морфологичности при систематизации и классификации зубчатых передач, способов их теоретического и технологического формообразования, способов сборки, эксплуатации и ремонта;
- принцип прямой и обратной связи и информационной соподчиненности этапов жизненного цикла;
- принцип рекуррентного приближения к оптимальному варианту;
- принцип вариации;
- принцип селекции;
- принцип многокритериального синтеза;
- принцип валидации.

Эти принципы относятся к разработке как структуры системы синтеза зубчатых передач, так и разработке математических моделей и информационных технологий поддержки этапов их жизненного цикла.

Прежде чем создавать математические модели этапов жизненного цикла и на их основе информационные технологии поддержки этих этапов необходимо определить структуру системы, т.е. весь жизненный цикл зубчатой передачи разбить на этапы и соединить эти этапы прямыми и обратными связями в одну техническую систему.

Анализ существующих технических систем и этапов жизненного цикла зубчатых передач разных классов типов, типов и видов позволяет представить обобщенную структуру синтеза в виде, представленном на рисунке 1.

Учитывая принцип развития системы, этапы структуры жизненного цикла зубчатых передач могут быть добавлены, раздроблены или объединены.

Данная система представлена в виде плоской технической системы синтеза зубчатых зацеплений, но фактически она является технической системой третьего типа и в дальнейшем она будет развернута в пространственную [2].

Отметим некоторые особенности этапов жизненного цикла зубчатых передач новой системы синтеза зубчатых передач.

На первом этапе синтеза задаются исходные данные, выбирается класс, вид или тип передачи, передаточное число, передаваемая мощность, угловая скорость, гистограмма нагружения зубчатой передачи в ступенчатом или плавном виде. Выбирается материал, точность и состояние поверхностного слоя зубчатой передачи.

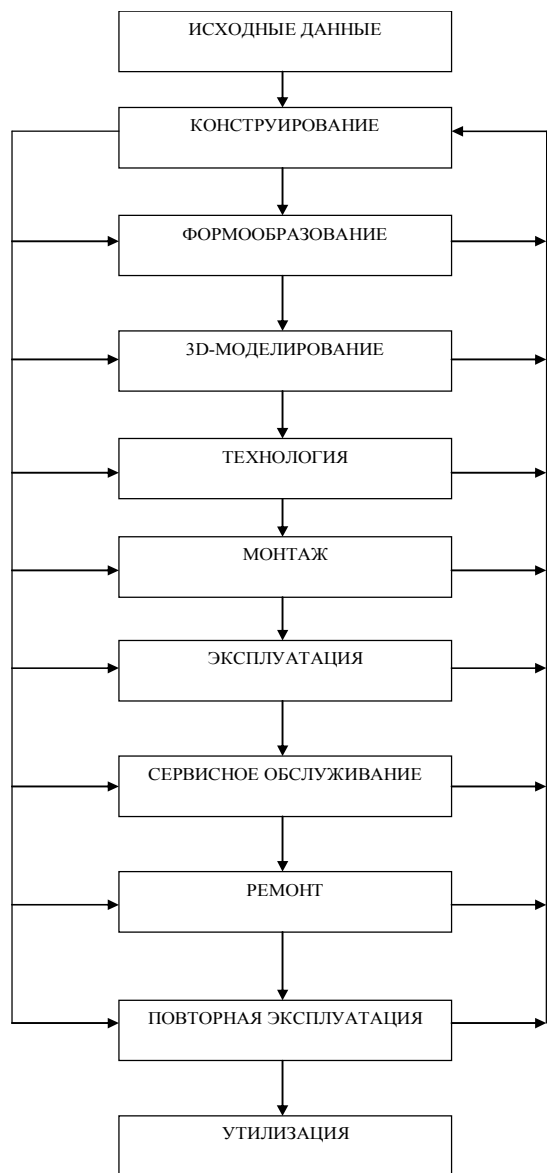


Рисунок 1 – Обобщенная структура технической системы синтеза зубчатых передач с учетом жизненного цикла

жен рассматриваться в своем конструктивном оформлении (коническая передача – без замены ее на эквивалентную цилиндрическую [22]).

Важнейшим этапом жизненного цикла зубчатой передачи является технологический этап. Этот этап характеризуется многовариантностью и осуществ-

При функционировании предлагаемой системы мы можем расширить требования к зубчатой передаче и задавать сферу применения и назначения, функциональные, эксплуатационные, энергетические, экономические, экологические, массогабаритные и др. показатели. Необходимо в исходные данные ввести показатели, отнесенные к единице передаваемой мощности.

На втором этапе выполняются прочностные расчеты на изгибную и контактную прочность и определяются основные габариты передачи, делительная поверхность, модуль, шаг. Затем одним из методов формообразования определяется полная геометрия зубчатой передачи, строится ее 3-D модель и выполняются расчеты на изгибную и контактную выносливость.

Расчеты на выносливость основываются на комплексной математической модели усталостного разрушения зубьев. Ее обобщенная модульная структура подробно рассмотрена в [27].

Необходимо добавить в эту модульную структуру расчеты на "горячее" и "холодное" заедание [22]. Структура расчета зубчатых передач должна быть единой для всех видов передач (цилиндрических, конических, червячных и др.). При этом каждый тип передачи должен

лется формообразованием группой последовательно работающих инструментов (инструментальных систем) и процессов. В новой системе технология изготовления зубчатых передач включает анализ каждой операции (черновой, полустойковой, термообработки, чистовой и отделочной.). Например, особенностями технологического синтеза (технологической системы) зубчатой передачи является не исправление погрешностей как при изготовлении простых деталей, а преобразование погрешностей на последовательных операциях зубообработки, задание не только величины, но и формы припуска. В новой системе предусмотрен анализ методом вариации погрешностей на каждой операции, влияние переточек инструмента на точность обработки, расчет инструментов второго и третьего порядка.

При выполнении чистовых и отделочных операций необходима модификация припуска, необходимо учесть переточки, которые изменяют форму припуска. Следовательно, надо вернуться к последовательному формообразованию, провести анализ переточек, определить область существования каждого инструмента и выбрать оптимальную ее часть, провести анализ способов чернового и чистового формообразования методом следа центроидного и внецентроидного обката. Т.е. исследовать всю цепочку технологического формообразования.

В процессе реализации этапов жизненного цикла приходится неоднократно использовать редактирование поверхностей зубчатых венцов [28], теоретическое прямое и обратное формообразование. Используя принцип обобщения, приведем пример обобщенной кинематической схемы прямого и обратного формообразования (рисунок 2) и обобщенной унифицированной математической модели формообразования при двухпараметрическом обгании.

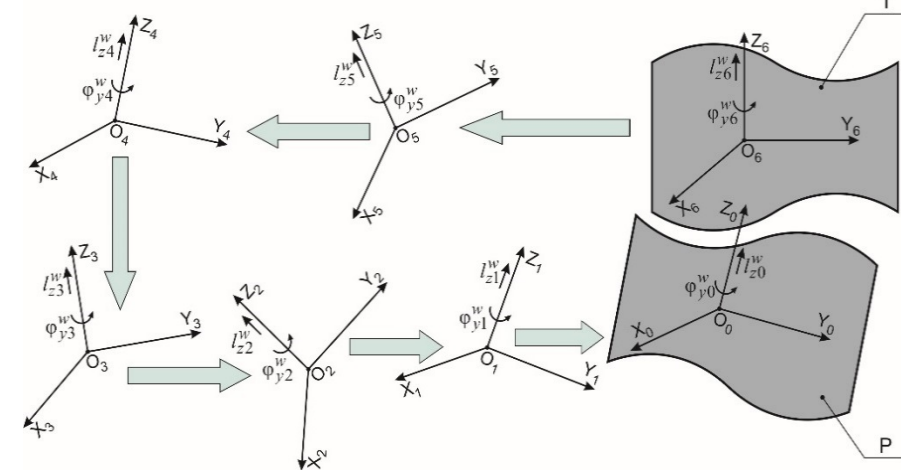


Рисунок 2 – Схема области существования обобщенной кинематической схемы формообразования зубчатых звеньев различных классов, типов и видов: Т – формообразующее зубчатое звено; Р – формообразуемое зубчатое звено

Учитывая частное задание осей системы координат и частное задание движений, с учетом расширения степени возможной относительной подвижности формообразующего зубчатого звена до 6-ти и задание в каждом из реперов только одного движения l_{zi}^w или $\bar{\varphi}_{zi}^w$, область существования обобщенной

унифицированной кинематической схемы может быть представлена рисунком 2. Эта схема – обобщенная, поскольку включает все известные кинематические схемы как теоретического, так и технологического формообразования, а также неизвестные схемы, требующие исследования. Унифицированной она является потому, что в каждом репере при конкретной схеме задается только одно движение, матрицы которого унифицированы [26].

Обобщенная унифицированная математическая модель формообразования зубчатых колес в общем случае при двухпараметрическом огибании имеет вид [26]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{r\partial 0} H / D = m_{v_{y1}^w} m_{c_{y1}^w} m_{v_{x1}^w} m_{\phi_{z1}^w} m_{\ell_{z1}^w} m_{v_{y2}^w} m_{c_{y2}^w} m_{v_{x2}^w} m_{\phi_{z2}^w} m_{\ell_{z2}^w} m_{v_{y3}^w} \cdot \\ \cdot m_{c_{y3}^w} m_{v_{x3}^w} m_{\phi_{z3}^w} m_{\ell_{z3}^w} m_{v_{y4}^w} m_{c_{y4}^w} m_{v_{x4}^w} m_{\phi_{z4}^w} m_{\ell_{z4}^w} m_{v_{y5}^w} \cdot \\ \cdot m_{c_{y5}^w} m_{v_{x5}^w} m_{\phi_{z5}^w} m_{\ell_{z5}^w} m_{v_{y6}^w} m_{c_{y6}^w} m_{v_{x6}^w} m_{\phi_{z6}^w} m_{\ell_{z6}^w} m_{r\partial 6}^w; \\ \phi_{z6A}^w \leq \phi_{z6}^w \leq \phi_{z6B}^w; \\ \phi_{zi}^w = f_{\phi_{zi}^w}(\phi_{z6}^w); \\ l_{zi}^w = f_{l_{zi}^w}(\phi_{z6}^w); \\ m_{r\partial}^w m_{rv} = 0 \text{ при } \phi_{z6}^w = \text{const}; \\ m_{r\partial}^w m_{rv} = 0 \text{ при } \phi_{zi}^w = \text{const}. \end{array} \right.$$

Приведенная обобщенная кинематическая схема и обобщенная унифицированная математическая модель формообразования зубчатых колес представляет множество возможных кинематических схем и математических моделей теоретического и технологического формообразования цилиндрических зубчатых колес различных классов, типов и видов [26].

В новой системе на этапе сборки уточняются параметры точности сборки, суммарное пятно контакта, необходимость модификации для компенсации погрешностей сборки. Для обеспечения модификации необходимо вернуться ко второму этапу уточнить контактную прочность, а затем и к третьему – уточнить технологию.

На этапе эксплуатации уточняются динамические характеристики, шум и вибрации. Если нас не удовлетворяют динамические характеристики, то необходимо изменить геометрию, изменить коэффициент перекрытия или использовать профильную модификацию. А затем необходимо снова вернуться к третьему этапу, и обеспечить эту модификацию технологически. Этим реализуется принцип рекуррентных (возвратных) связей в технической системе. На этапе эксплуатации уточняются условия смазки.

На этапе ремонта необходимо классифицировать виды критических состояний зубчатых передач, приводящие к потере работоспособности, методики их определения и фиксирования и всех известных способов ремонта.

Выводы и программа дальнейших исследований:

1. Обоснована актуальность разработки новой технической системы синтеза зубчатых передач и информационных технологий поддержки всех этапов ее жизненного цикла с использованием современных концепций.

2. В результате обзора установлено, что обобщенные матмодели и информационные технологии поддержки всех этапов жизненного цикла зубчатых передач отсутствуют.

3. Впервые представлена концепция, структура и принципы создания и функционирования новой технической системы синтеза зубчатых зацеплений. Это позволит синтезировать зубчатые передачи с более высокими качественными показателями и обеспечить валидацию всех этапов ее жизненного цикла.

3. Показано, что структура расчета зубчатых передач на изгибную и контактную прочность и долговечность должна быть единой для всех видов передач (цилиндрических, конических, червячных и др.). При этом, каждый тип передачи должен рассматриваться в своем конструктивном оформлении (коническая передача – без замены ее на эквивалентную цилиндрическую).

4. Приведены примеры обобщающей кинематической схемы формообразования зубчатых передач различных классов, типов и видов и ее обобщающей унифицированной математической модели.

5. Необходимо разработать обобщенную модель формообразования с учетом методов вариации, влияния погрешностей относительной установки зубчатое колесо – инструмент на погрешности реального технологического формообразования на каждой операции.

6. Нет эффективной системы редактирования геометрии всех поверхностей зубчатых венцов. Поэтому, на основе теории сплайнов и кривых Безье необходимо разработать методику редактирования всех поверхностей зубчатого венца зубчатых передач различных классов, типов и видов включая модификацию.

7. Для реализации новой технической системы синтеза зубчатых передач необходимо синтезировать одну из перспективных конструкций зубчатой передачи, реализовать ее и подвергнуть валидации ее способности удовлетворять потребности заказчика.

Список литературы: 1. *Медведев Ф.В., Нагаев И.В.* Автоматизированное проектирование и производство деталей сложной геометрии на базе программного комплекса PowerSolution: Учеб. пособие / Под общ. ред. *А.Г. Громашева*. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005 – 167с. 2. *Тернюк Н.Э., Дудукалов Ю.В., Федченко В.В., Гладка Н.Н.* Системно-процессное моделирование технических систем в calcs-технологиях // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, 2011, № 49. – с.124-133. 3. *Litvin, F.L.* Gear Geometry and Applied Theory. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994. – 724p. 4. *Ерихов М.Л.* Принципы статистики, методы анализа и вопросы синтеза зубчатых зацеплений: Дисс. докт.техн.наук. – Хабаровск, 1972. – 324с. 5. *Колчин Н.И.* Аналитический расчет плоских и пространственных зацеплений – М.: Машгиз, 1949. 6. *Шевелева Г.И.* Теория формообразования и контакта движущихся тел. – М.: Изд-во "Станкин", 1999. – 494с. 7. *Шишов В.П.* Теория, математическое обеспечение и реализация синтеза высоко нагруженных передач зацеплением для промышленного транспорта: дисс. докт.техн.наук. – Луганск, 1994. – 525с. 8. *Вулгаков Э.Б.* Теория эвольвентных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1995. – 264с. 9. *Родин П.Р.* Основы формообразования поверхностей резанием. – Киев: Выща шк., 1977. – 192с. 10. *Лашнев С.И., Юшков М.И.* Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1980. – 208с. 11. *Грановский Г.И.* Кинематика резания. – М.: Машгиз, 1948. – 199с. 12. *Цвис Ю.В.* Профилирование режущего обкатного инструмента – М.: Машгиз, 1961. – 155с. 13. *Перепелица Б.А.* Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. – Харьков: Выща шк., 1981. – 152с. 14. *Бабичев Д.Т.* Развитие теории зацеплений и формообразования поверхностей на основе новых геометро-кинематических представлений: Дисс... докт.техн.наук: 05.02.18 Теория механизмов и машин. – Тюмень, 2005. – 424с. 15. *Люкин В.С.* Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1967. – 372с. 16. *Радзевич С.П.* Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ. – Киев: Вища школа. – 192с. 17. *Решетов Д.Н., Портман В.Т.* Точность металлообрабатывающих станков – М.: Машиностроение, 1986. – 336с. 18. *Сегаль М.Г.* Виды локализованного контакта в конических и гипойдных передачах // Машиноведение. – М., 1970. – №1. – С.56-63. 19. *Калашиников С.Н., Калашиников А.С.* Зубчатые колеса и их изготовление

– М.: Машиностроение, 1983. – 264с. **20.** Производство зубчатых колес: [Справочник под общей редакцией *Б.А. Тайца*. 3-е изд. перераб. и дополн.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 464с. **21.** *Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов М.Н.* Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых передач. – М., 1981. – 322с. **22.** *Заблонский К.И.* Анализ факторов, влияющих на нагрузку в зацеплении, и их отражение в расчетах зубчатых передач // Vortragsband Tagung "Zahnradgetriebe Dresden 1989". – Dresden: TUD, 1989. – S.44-59. **23.** *Кириченко А.Ф., Павлов А.И.* Подальший розвиток теорії зацеплень для побудови силових зубчастих передач // Машинознавство. – Львів. – 2003. **24.** *Устиненко В.Л.* Напряженное состояние зубьев цилиндрических прямозубых колес. – М.: Машиностроение, 1972. – 92с. **25.** *Павлов А.И.* Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – 100с. **26.** *Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Сторчак М.Г.* Проектирование формообразующего оборудования и инструментальных систем для обработки зубчатых колес // Теория и практика зубчатых передач: Сборник трудов Международного симпозиума. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2014. – С.484-489. **27.** *Устиненко А.В.* Математическое моделирование процессов усталостного разрушения зубьев // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. науч. трудов. Тем. вып. "Машиноведение и САПР". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2012. – №22. – С.170-175. **28.** *Воронцов Б.С.* Интерактивное управление синтезом зубчатых передач // Вестник НТУ "ХПИ": Сборник научных трудов. Тем. вып. "Проблемы механического привода". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – №40. – С.182-187.

Bibliography (transliterated): **1.** *Medvedev F.V., Nagaev I.V.* Avtomatizirovannoe proektirovanie i proizvodstvo detalej slozhnoy geometrii na baze programmnogo kompleksa PowerSolution: Ucheb. posobie / Pod obshh. red. *A.G. Gromasheva*. – Irkutsk: Izd. IrGTU, 2005 – 167p. **2.** *Ternyuk N.E., Dudukalov Yu.V., Fedchenko V.V., Gladka N.N.* Sistemno-processnoe modelirovanie tehniceskikh sistem v CALS-tehnologiyah // Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tehnologii, 2011, No49. – P.124-133. **3.** *Litvin F.L.* Gear Geometry and Applied Theory. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994. – 724p. **4.** *Erihov M.L.* Principy statistiki, metody analiza i voprosy sinteza zubchatykh zacepleniij: Diss. dokt. tehn. nauk. – Khabarovsk, 1972. – 324p. **5.** *Kolchin N.I.* Analiticheskij raschet ploskih i prostranstvennykh zacepleniij – Moscow: Mashgiz, 1949. **6.** *Sheveleva G.I.* Teoriya formoobrazovaniya i kontakta dvizhushihysya tel. – Moscow: Izd. "Stankin", 1999. – 494p. **7.** *Shishov V.P.* Teoriya, matematicheskoe obespechenie i realizaciya sinteza vysokonagruzhennykh peredach zacepleniem dlya promyshlennogo transporta: diss. dokt. tehn. nauk. – Lugansk, 1994. – 525p. **8.** *Vulgakov E.B.* Teoriya evol'ventnykh zubchatykh peredach. – Moscow: Mashinostroenie, 1995. – 264p. **9.** *Rodin P.R.* Osnovy formoobrazovaniya poverhnoy reziem. – Kiev: Vyshha shk., 1977. – 192p. **10.** *Lashnev S.L., Yulikov M.I.* Proektirovanie rezhushhey chasti instrumenta s primeneniem EVM. – Moscow: Mashinostroenie, 1980. – 208p. **11.** *Granovskij G.I.* Kinematika rezaniya. – Moscow: Mashgiz, 1948. – 199p. **12.** *Cvis Yu.V.* Profilirovanie rezhushhego obkatnogo instrumenta – Moscow: Mashgiz, 1961. – 155p. **13.** *Perpelica B.A.* Otbrazhenie affinnogo prostranstva v teorii formoobrazovaniya poverhnoy reziem. – Khar'kov: Vyshha shk., 1981. – 152p. **14.** *Babichev D.T.* Razvitiye teorii zacepleniij i formoobrazovaniya poverhnoy na osnove novykh geometro-kinematicheskikh predstavlenij: Diss. dokt. tehn. nauk: 05.02.18 Teoriya mehanizmov i mashin. – Tyumen', 2005. – 424p. **15.** *Ljukshin V.S.* Teoriya vintovykh poverhnoy v proektirovanii rezhushhih instrumentov. – Moscow: Mashinostroenie, 1967. – 372p. **16.** *Radzevich S.P.* Formoobrazovanie slozhnykh poverhnoy na stankah s ChPU. – Kiev: Vishha shkola. – 192p. **17.** *Reshetov D.N., Portman V.T.* Tochnost' metallovezhushhih stankov – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 336p. **18.** *Segal' M.G.* Vidy lokalizovannogo kontakta v konicheskikh i gipoidnykh peredachah // Mashinovedenie. – Moscow, 1970. – No1. – P.56-63. **19.** *Kalashnikov S.N., Kalashnikov A.S.* Zubchatye kolea i ih izgotovlenie – Moscow: Mashinostroenie, 1983. – 264p. **20.** Производство зубчатых колес: [Справочник под обшей редакцией *Б.А. Тайца*. 3-е изд. перераб. и дополн.]. – Moscow: Mashinostroenie, 1990. – 464p. **21.** *Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов М.Н.* Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых передач. – Moscow, 1981. – 322с. **22.** *Заблонский К.И.* Анализ факторов, влияющих на нагрузку в зацеплении, и их отражение в расчетах зубчатых передач // Vortragsband Tagung "Zahnradgetriebe Dresden 1989". – Dresden: TUD, 1989. – P.44-59. **23.** *Кириченко А.Ф., Павлов А.И.* Подальший розвиток теорії зацеплень для побудови силових зубчастих передач // Машинознавство. – Львів. – 2003. **24.** *Устиненко В.Л.* Напряженное состояние зубьев цилиндрических прямозубых колес. – Moscow: Mashinostroenie, 1972. – 92с. **25.** *Павлов А.И.* Современная теория зубчатых зацеплений. – Khar'kov: HNADU, 2005. – 100p. **26.** *Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Сторчак М.Г.* Проектирование формообразующего оборудования и инструментальных систем для обработки зубчатых колес // Теория и практика зубчатых передач: Сборник трудов Международного симпозиума. – Ижевск: Изд. ИжГТУ, 2014. – С.484-489. **27.** *Устиненко А.В.* Математическое моделирование процессов усталостного разрушения зубьев // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. науч. трудов. Тем. вып. "Машиноведение и САПР". – Khar'kov: NTU "KhPI", 2012. – No22. – P.170-175. **28.** *Воронцов Б.С.* Интерактивное управление синтезом зубчатых передач // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. науч. трудов. Тем. вып. "Проблемы механического привода". – Khar'kov: NTU "KhPI", 2005. – No40. – P.182-187.

Поступила (received) 26.04.2015

Н.Н. КУЗЬМЕНКО, к.т.н., доцент каф. метрологии и приборов
ВНУ им. В. Даля, Северодонецк

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ КВАЗИГЛОБОИДНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В статье рассмотрена технология изготовления зубьев квазиглобальных зубчатых колес разной геометрии с помощью новой схемы формообразования, когда передние режущие грани не находятся в одной плоскости, в которой находится и ось вращения квазиглобальной заготовки, что приводит к повышению точности изделия. Проведено исследование суммарного пятна контакта квазиглобальной червячной зубчатой передачи. Определена площадь суммарного пятна контакта квазиглобальных зубчатых передач.

Ключевые слова: квазиглобальное зубчатое колесо, инструментальное колесо, зубонарезание, формообразование.

Актуальность задачи. Многолетний опыт производства и эксплуатации зубчатых передач показал большое влияние технологических факторов на динамику, виброактивность, ресурс и надежность работы передач. Технология производства "бесшумных" передач повышенного ресурса эксплуатации должна обеспечивать: высокую точность изготовления базовых поверхностей и всех элементов зацепления; высокое качество химико-термического упрочнения рабочих поверхностей зубчатых колес; оптимальную модификацию рабочих поверхностей зубьев, обеспечивающую снижение динамических нагрузок и вибраций в зацеплении и исключающую заедание зубьев в работе зубчатых пар; низкую шероховатость рабочих поверхностей зубьев; снижение затрат на изготовление зубчатых колес.

Сложность поставленных перед технологией производства зубчатых колес задач требует комплексного подхода к их решению, основой которого является разработка базовых технологических процессов механической и химико-термической обработки, оснащение производства высокоточным и производственным оборудованием, современными комплексами вычислительной техники и программными продуктами.

Основная часть. Разработка технологического процесса изготовления зубчатых колес начинается и ведется параллельно с разработкой конструкции зубчатой передачи, при этом определяется возможность их изготовления в условиях конкретного серийного производства. Технологический процесс (маршрут), устанавливающий последовательность выполнения операций обработки, строится в зависимости от многих конструктивно-технологических особенностей зубчатого колеса, определяющей из которых является выбор вида химико-термического упрочнения его рабочих поверхностей.

Работоспособность зубчатых колес в значительной степени зависит от правильного выбора геометрии зацепления (формы и величины модификации рабочих поверхностей зубьев), точности изготовления и качества поверхностного слоя зубьев. Эксплуатационные свойства зависят от воздействия на поверхностный слой зубьев комплекса технологических и металлургических факторов, которые тесно взаимодействуют между собой.

Для совершенствования производства зубчатых колес требуется разработка единой системы управления процессом изготовления деталей, затрудня-