

УДК 631.3

DOI: 10.12737/article\_5a02f9fe1a2b69.43281503

И.А. Титенок

## ЭВОЛЮЦИЯ ФОРМЫ ЗУБЬЕВ ВНЕШНЕГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СИЛОВОГО ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Представлена картина изменений в зубчатом зацеплении. Выявлены основные признаки и разработана классификация этих изменений. Определены основные направления развития формы зубьев, влияющие на качество зацепления внешней сило-

вой зубчатой передачи.

**Ключевые слова:** зубчатое зацепление, форма зубьев, теория зацепления, изменения, эволюция, классификация.

I.A. Titenok

## TEETH FORM EVOLUTION IN EXTERNAL CYLINDRICAL POWER GEARING

The paper is devoted to the investigation and historical-engineering analysis of the development process of gearing in external cylindrical power gear.

The purpose of the work consists in presentation of changes situation in a gearing; in the detection of basic signs and classification development of these changes; in the definition of basic directions in the tooth form development which affect linking quality of an external power gear.

In the paper there are considered modification processes and changes occurred in the course of time, which are typical for gearing: a shape profile of gear-

ing; a tooth contact in gearing; material types used for manufacturing tooth linking and cog-wheels; in the design of a cog-wheel and a gearing reducer.

There is created an evolution pattern and classification of gearing changes. Integral indices characterizing the evolution processes of different gearing types are offered. Corresponding conclusions are drawn and an outlook in gearing development is defined.

**Key words:** gearing, tooth form, theory of linking, changes, evolution, classification.

### Введение

Классическим в данной работе считается то зацепление, которое имеет более чем вековую историю развития, а также занимало или занимает доминирующую позицию в практическом применении. Неклассическим названо зацепление, развитие которого исчисляется десятилетиями или годами при незначительном практическом применении.

Передача зубчатыми колесами - одна из старейших механических передач. Ее авторы неизвестны. Первые зубчатые передачи были случайно найдены в пластах каменного угля, происхождение которых относят к 2500 году до нашей эры. Это время можно принять за точку отсчета, которая дала начало эволюции зубчатого зацепления в форме примитивного изделия. Платон и Аристотель сообщали о применении зубчатых колес за 3,5 в. до н. э. Изобретение зубчатого колеса в некоторых источниках приписывают Архимеду (257-212 гг. до н.э.). К простым расчетам (определению передаточных отношений и действующих сил) прибегали мыслители

Древней Греции. Это было связано с их практическим применением и положило начало двум техническим объектам: приборному металлическому часовому зубчатому механизму и силовым деревянным колесам на элеваторах - *1-е конструктивное разделение в развитии зубчатого зацепления.*

По свидетельству Паппа Александрийского (280-305 гг. н.э.), зубчатая передача применялась за 150 лет до н.э. Марк Витрувий тоже писал о зубчатой передаче. Были изобретены сложные по конструкции цилиндрические передачи, а также передачи с пространственным расположением осей - *2-е конструктивное разделение в развитии зубчатого зацепления.*

Веками формировалась не только зарубежная, но и отечественная наука о зубчатых передачах. Выполнив краткий обзор современного состояния науки о зубчатых передачах за рубежом, Д.Т. Бабичев сделал выводы: идеология проектирования в точности совпадает с той, что принята в Рос-

сии; методология проектирования передач такая же, как в России. Отечественные и зарубежные ученые внесли большой вклад в развитие теоретических основ расчета и конструирования зубчатых передач. Перечислить всех авторов, посвятивших свои работы развитию науки о зубчатых передачах, не представляется возможным. В библиографических указателях «Передачи зацеплением» Института машиноведения им. А.А. Благонравова они исчисляются тысячами.

Отечественная наука о зубчатых колесах сформировалась к середине 20-го века и состоит из следующих главнейших разделов:

1. Теория зацепления (Х.И. Гохман, Б.Н. Лебедев, Х.Ф. Кетов, Н.И. Колчин, И.А. Фрайфельд, В.Н. Кедринский, К.М. Писманик, Н.Ф. Кабатов, Г.А. Лопато, М.Г. Сегаль, В.В. Болдырев, Ф.Л. Литвин, М.Л. Новиков и др.).

2. Геометрическая теория зубчатых передач (Е.А. Чудаков, И.Г. Бармас, В.И. Кедринский, Н.Б. Громан, Х.Ф. Кетов, Н.А. Калашников, Я.И. Дикер, Л.Л. Ванников, Л.Н. Решетов, А.Н. Калужников, Н.П. Лопухов, С.С. Миловидов, Я.С. Давыдов, В.А. Гавриленко, В.Н. Кудрявцев, В.В. Добровольский, Г.Н. Лист, Б.А. Тайц, М.Б. Лихциер, И.А. Болотовский, В.В. Шульц и др.).

3. Теория точности зубчатых передач (Н.Г. Бруевич, Н.А. Калашников и др.).

4. Теория прочности и износа зубчатых передач (А.В. Осипян, А.И. Петрусевич, М.З. Сабуров, Н.М. Беляев, А.Н. Динник, Я.Г. Кистьян, В.В. Шульц и др.).

5. Теория изготовления, включая инструмент (Г.И. Грановский, И.И. Семенченко, А.Н. Грубин, М.Д. Генкин, В.М. Матюшин, М.С. Полоцкий и др.).

В последней четверти 20-го века наука о зубчатых зацеплениях выступила в роли инструмента для решения конкретных инженерных задач. Получила развитие теория зацеплений. Несмотря на значительные успехи науки, о процессе раз-

вития зубчатого зацепления имеется немного сведений, преимущественно описательного характера (у Д.Т. Бабичева, Т. Бека, О. Каммерера, В.А. Гавриленко, Ф.Л. Литвина, А.Н. Боголюбова). Это весомая причина для исследования и создания картины эволюции зубчатого зацепления. На основе изучения в Институте истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН более четырехсот достоверных исторических и технических источников автором статьи сделан вывод: эволюция зубчатого зацепления происходила в две стадии.

На 1-й стадии эволюции (примерно с 350 лет до н.э. и до середины 17-го века н.э.) форма зубьев не была обоснована теорией. На 2-й стадии (с середины 17-го века и по настоящее время) теорией и практикой направлялось развитие формы зубьев классических видов зацеплений (циклоидального и эвольвентного - со времен Дезарга, Делагира и Эйлера) и неклассических зацеплений (Малкина, Новикова, Шульца, Вулгакова, Сидоренко, Вильдгабера и др.). 2-я стадия эволюции зубчатого зацепления содержит 3 этапа.

В конце 1-го этапа (это рубеж 19-го и 20-го веков) идея зубчатого зацепления оформилась в конструкцию редуктора. Это дало начало качественным изменениям формы зубьев, способа смазки устройства; конструкции валов и подшипников; заложило основы охраны производственного труда в машиностроении.

На 2-м этапе (с начала 20-го века по наши дни) создано высококачественное эвольвентное зацепление с усложнением инструмента и технологии производства. Выявленная Л. Эйлером проблематика зависимости между плавностью работы и износом поверхностей эвольвентных зубьев сохранилась и с середины 20-го века легла в основу изобретения и развития неклассических форм зубьев, что открыло 3-й эволюционный этап зубчатого зацепления.

### Изменение формы профиля зубьев зацепления

Первые сведения о каком-либо обосновании геометрии зубьев силовой передачи, применяемой на практике, относятся к середине 15-го столетия. Это передача,

построенная к 1464 году для лебёдки в замке Минцета (Порт Пиле в Рагузе). Её зубья были выполнены в форме полукругов без знания закона зубчатого зацепле-

ния. Изображения зубчатых колес представлены в труде «*Vermannus, sive de re metalica*» Георгия Агриколы (1490-1555 гг.). Таков итог 1-й стадии (с 350 лет до н.э. и до середины 17-го века н.э.) в развитии геометрии зубчатого зацепления. Прimitивная форма зубьев не могла обеспечить точный контакт в зацеплении. Это усиливалось примитивностью конструкции и низкими технологическими возможностями изготовления самой передачи.

На 1-м этапе 2-й стадии эволюции зубчатого зацепления (с середины 17-го и до конца 19-го века) потребности в силовом приводе стали формировать условия для его развития. Научное обоснование зубчатых зацеплений было положено в начале XVII века, когда комбинация двух цилиндрических колес была подвергнута геометрическому изучению. Изучение циклоиды осуществлялось Жераром Дезаргом (*Gerar Desagrués*, 1593-1662 гг.), Гюйгенсом (1629-1695 гг.) и Делагиром (*F. de la Hire*, 1640-1718 гг.). Дезарг работал над теорией зубчатых колес в 1644-1649 годах. Траектории, описываемые различными точками плоской фигуры при циклическом движении, назвали циклическими кривыми. Они были открыты датским астрономом Олафом Ромером (*Romer*) в 1674 году и применены им к очерчиванию профилей зубьев в зубчатых колесах (доклад Парижской академии наук представлен в 1675 г.). Приоритет Ромера оспаривал Делагир, работавший над профилированием зубьев в 1694-1695 годах. Он заявил, что уже в 1674 году впервые опубликовал свои идеи относительно профилирования по эпициклоиде. Ф. Делагир изучил циклоидальную форму профиля зуба и обосновал необходимость ее применения для больших зубчатых колес насосов, ветряных установок и мельниц. Он также предложил использовать эвольвенту в качестве кривой, ограничивающей форму профиля зубьев зацепления. В своем научном трактате «*Traite des epicycloides et leur usage dans les mecanigues...*» Делагир первым дал геометрическое построение зубьев в цилиндрических колесах, основанное на доказанных им свойствах эпициклоиды. Сам Делагир приписывает изобретение колес с такими зубьями своему знаменитому предшественнику, геометру Дезаргу. Дела-

гиру принадлежит первый чертеж зубчатого зацепления. Учеными был сделан вывод о необходимости применять эпициклоиду и гипоциклоиду для профилирования зубьев колес.

В 1733 году французский математик М. Камус (1690-1768 гг.) опубликовал труд, где углубил теоретическое исследование зацеплений, основанное работами Делагира. Камус математически обосновал условия зацепления циклоидальных зубчатых колес. До тех пор пока зубья зацепления выполняли из дерева, не требовалось математического обоснования точной их формы. Достаточно было новые зубья хорошо подогнать по форме старых. В 1724 году в Лейпциге был издан первый том работы Якоба Леопольда (*Jacob Leupold*, 1674-1727 гг.), известной под названием «Театр машин», где автор дает элементы теории эпициклоидального зацепления (по сути - цевочного) с деревянными зубьями, имевшего распространение в середине XIII века. Почти через столетие, в 1826 году, профессор математики Лангсдорф привел схожее эмпирическое правило голландских строителей мельниц - головка зуба описывалась радиусом из центра штока, т.е. в зубчатом зацеплении практически не было изменений.

Зацепление с циклоидальным профилем зубьев интенсивно развивалось в период с 17-го до середины 19-го века. Затем начался экстенсивный период его развития. Л.П. Эйлером (1707-1783 гг.) были сформулированы основы теории эвольвентного зацепления (1760, 1765 гг.) и найдено в нем техническое противоречие – между обеспечением плавности работы и трением поверхностей зубьев. Эйлер предложил пренебречь трением в зацеплении. Математическая зависимость между кривизной centroидов и траекторией движущейся точки впервые была дана Эйлером, а также связана с именем Савари (*Savary*), поэтому в настоящее время полученная зависимость носит название формулы Эйлера - Савари. Это аналитическое решение было заменено геометрическим построением, предложенным Бобилье (*Bobillier*).

После опубликования трудов Эйлера теорией формы зубьев колес занимались Кестнер, Фергузон, Буханан, Хавкинс, Ренни и Айри. Теория плоских зацеплений

разрабатывалась во Франции. Понселе (Ponselet), Камусу (Camus) и Боуру (Bour) принадлежит заслуга разработки метода огибающих кривых и рулетт (от фр. rouler - катить; сопряженные или взаимоогibaющие кривые либо centroиды - кривые, катящиеся без скольжения) для получения сопряженных профилей зубьев в плоском зубчатом зацеплении. На историческом отрезке XVII-XVIII вв. была разработана принципиальная геометрическая схема современных зубчатых передач на базе теоретических изысканий, которые наметили уже некоторые контуры будущей науки о зубчатых колесах в части теории зацепления.

В 1841 году англичанин Р. Виллис (R. Willis) сформулировал основную теорему плоского зацепления. Виллис опубликовал сообщения о зубчатых зацеплениях и одонтографе. Тогда же он начал писать «Принципы механизмов». С выходом этого сочинения английская школа теории механизмов в середине XIX в. становится ведущей. Работа Виллиса не осталась незамеченной и вышла за пределы Англии.

Если школа Монжа разложила машины на составляющие их элементы и разработала принцип преобразования движения, а Понселе разработал теорию двигателя, то Виллису и его последователям принадлежит честь изучения промежуточных механизмов - передач. В числе своих последователей Виллис называет Тэта, Ранкина, Фэйнберна - в Англии, Лабуле, Беланже, Жиро - во Франции.

Работа Эйлера была продолжена во Франции Оливье (Olivier, 1842 г.). Для определения сопряженных поверхностей зубьев Оливье применил аналитическую теорию огибающих поверхностей. По теории Трансона (Transon, 1845 г.), любое движение плоской фигуры можно заменить перекачиванием круга по прямой линии. В 1861 году француз Гупийер ввел понятие модуля зацепления. В 1872 году П.Л. Чебышев заложил фундамент к изучению реальных зацеплений, посвященный приближенному очертанию зубчатых колес, который впоследствии найдет свое завершение в трудах Н.Г. Бруевича. Профессор Realeaux (1875 г.) дает семь способов для построения

сопряженных профилей. С изобретением станков появилась возможность изготовления зубьев различного профиля, что привело к быстрому развитию раздела прикладной механики по зубчатым колесам.

В середине XIX в. немецкий доктор-инженер, профессор высшего технического училища в Штутгарте К. Бах (Bach) создал элементарный метод расчета зубьев на изгиб. Основой расчета размера зуба колеса принята относительная нагрузка на него, в расчеты которой вносились поправки (например, Рэло). Расчет прямых зубьев на изгиб по Баху строился по схеме их нагружения. Предполагалось, что зуб изгибается окружным усилием, рассчитанным по начальной окружности и приложенным к вершине одного зуба перпендикулярно его средней плоскости. Расчет зуба ведется как расчет балки, защемленной одним концом и нагруженной силой.

Работа Льюиса, опубликованная в 1892 г., уже позволяла в расчетах на прочность учитывать геометрию зуба, представленного в виде тела равного сопротивления. Льюис ввел понятие коэффициента формы зуба - это параметр, определяющий влияние геометрии колеса на величину напряжений изгиба в опасном сечении зуба.

Для напряжений в зоне контакта взаимодействующих под нагрузкой по образующей двух цилиндров в 1881 г. немецкий физик Генрих Герц разработал теоретические основы для расчетного определения контактных напряжений и деформаций для тел произвольной кривизны и предложил формулу, на которой базируются разработанные впоследствии методы расчета закрытых зубчатых передач. Из практики стало известно, что для достижения продолжительного срока эксплуатации зубчатых передач кроме прочности на изгиб существенное значение имеет сопротивление зубьев износу. На износ зубьев большое влияние оказывает не общая передаваемая нагрузка, а максимальное напряжение в точке контакта. Эти выводы были сделаны инженерами в Германии в 1926 г. Они способствовали широкому применению уравнения Герца для определения наибольшего давления между двумя

сопрягающимися поверхностями зубьев под нагрузкой.

Работа Оливье была развита в России Х.И. Гохманом (1886 г.), значительно упростившим нахождение поверхностей зубьев колес в качестве огибающих. Способ Гохмана (образование сопряженных поверхностей посредством движущейся поступательно, равномерно и прямолинейно винтовой поверхности) на 10 лет опередил метод нарезания червячными фрезами цилиндрических зубчатых колес с прямыми и винтовыми зубьями (появился в 1897 г.). Гохман исследовал образование сопряженных поверхностей зубьев при помощи плоскости, движущейся поступательно, равномерно и прямолинейно, чем предвосхитил появление в 1917 году способа нарезания зубчатых колес инструмен-

тальными рейками. К концу XIX в. теория зацепления зубчатых передач получила развитие, которое выделило ее в виде основного раздела науки о зубчатых колесах. Она обосновала различие между линейным и точечным зубчатыми зацеплениями и доказала возможность существования катящихся систем при различном относительном расположении осей. Теория обосновала также общий способ огибающих поверхностей во всеобъемлющем виде, позволяющий создавать новые типы зацеплений, установила законы профилирования сопряженных боковых поверхностей зубьев по кривым различного рода, выявила кинематические зависимости в отдельных системах зацеплений, их скоростные ситуации, условия скольжения и т.п.

### Изменение продольного зубчатого контакта в зацеплении

Изначально колеса были прямозубыми. Первое техническое предложение для получения равномерной работы зубчатой передачи сделал Роберт Гук (1635-1703 гг.). Он предложил вариант изменения конструкции цилиндрической зубчатой передачи: зубчатое колесо выполнить из двух половин, относительно смещенных в плоскости вращения. Идея Гука применяется и в настоящее время – для устранения зазора между зубьями колес. Далее Р. Гук рассудил следующим образом. Если разрезать обыкновенное цилиндрическое колесо параллельными плоскостями, перпендикулярными оси колеса, затем повернуть каждую часть относительно рядом стоящей на небольшой, одинаковый для каждой части угол, то колесо примет вид многоступенчатого цилиндрического колеса. Правильность зацепления в таком случае не нарушается. Цель такого видоизменения цилиндрических колес заключается в достижении плавности передачи движения. Р. Гуком было изобретено косозубое цилиндрическое колесо взамен изначальной ступенчатой конструкции: при увеличении числа ступеней до бесконечности в пределе вся совокупность ступенек преобразуется в сплошной зуб винтовой формы - косой (прямые зубья передач, в отличие от косых, размещены по

образующей цилиндрической поверхности). Линия зацепления таких зубьев уже не лежит в плоскости колеса, а смещается по его толщине, но проекции линий зацепления обоих упомянутых типов колес совпадают. Идея Р. Гука о ступенчатых и винтовых колесах была забыта. В начале XIX в. такие колеса вновь изобрел Уайт (White). В последний раз о винтовом зацеплении Гука упоминается в курсе прикладной механики Д.С. Зернова (1925 г.).

В прямозубых передачах динамические нагрузки выше, чем в косозубых, потому что суммарная жесткость сопряженных зубьев, а следовательно, и их деформация резко изменяются (до 2 раз) при пересопряжениях - в зависимости от того, одна или две пары зубьев находятся в зацеплении. В косозубых передачах это явление выражено не в такой степени. Косозубые цилиндрические передачи получили широкое распространение в силовых приводах, коробках скоростей транспортных машин. Косые зубья очень просто изготавливаются дисковыми или червячными фрезами. Их недостаток состоит в том, что появляется осевое давление, пытающееся изогнуть шестерню в сторону и вал колеса по оси. Прямозубые колеса содержат в полюсе зацепления передачи две составляющие силы взаимодействия поверхностей

- окружную и радиальную. Косозубые передачи имеют еще одну составляющую силы взаимодействия - осевую, которая считается недостатком передачи, так как требует применения подшипников качения специальных конструкций.

### **Изменения характеристик контактирующих в зацеплении материалов**

Изначально зубья и сами колеса выполняли из дерева, что определяло сложность конструкции. Зубья зацепления, изготовленные из дерева, обеспечивали бесшумность работы. Деревянные зубчатые колеса были крупногабаритными из-за незначительного допускаемого напряжения дерева и недолговечными, требовали частой замены и ремонта. В 1769 году Смеатон предложил применять литые зубчатые колеса. Они имели большую прочность и необработанную поверхность зубьев, поэтому создавали большой шум в процессе работы. Трудности обработки металлических поверхностей зубьев стали причиной разработки в 1788 г. Ренни конструкции металло-деревянных колес, объединившей качества дерева и металла в работе зацепления. Он же предложил вручную (зубилом и напильником) обрабатывать поверхность зубьев. Ведомое колесо не должно было иметь деревянных зубьев - они устанавливались на ведущем колесе для обеспечения рациональной приработки. Начало внедрения в производство чугуна зубчатого зацепления в конце XVIII века потребовало знания точной формы зубьев - важнейшего фактора для обеспечения прочности и износостойкости зубьев, ставшего основой технологичности производства зубчатых колес. К форме зубьев зацепления стали предъявлять требования по минимизации потерь на трение. С началом применения чугуна возникла потребность в расчёте толщины зуба в зависимости от производимой работы. Одним из первых, кто занимался этой задачей, был Тредгольд. В своей работе «Практические сведения о прочности чугуна» (Лондон, 1822 г.) он изложил метод расчета зубьев колес на изгиб и учёл возможность поломок их углов.

С 1890 года улучшения качества работы зубчатого зацепления достигали

Для устранения этого недостатка Р. Гук предложил конструкцию колес со стрелчатыми зубьями - шевронное зацепление. Такие зубчатые колеса представляют сочетание двух винтовых колес с наклоном зубьев в разные стороны.

применением поглощающего шум материала (кожи, новотекса и т.п.), а также посредством применения смазочного материала. Первой, по предложению Лёве (Берлин, 1892 г.), это новшество внедрила фирма «Всеобщая компания электричества».

Ускорением для внедрения колес из стального литья с обработанными зубьями послужил ввод трамвая с электрическим приводом. Привод из сыромятной кожи с довольно габаритными зубьями не помещался в отводимом для его размещения месте. Необработанные зубья из-за возникающего шума тоже были непригодны, поэтому применили зубчатые колеса из стального литья с обработанными зубьями, работающие в масляной ванне. Начали применять сталь в производстве зубчатых колес.

Зубчатое зацепление развивалось путем повышения прочности сопряженных поверхностей (чем выше прочность, тем меньше износ), поэтому развитие логически завершилось колесами из металла (стальными). Благодаря повышению уровня развития промышленности они качественно отличались от неточных и необработанных первых металлических изделий. От деревянных колес перешли к изготовлению чугунных и стальных изделий, от термически необработанных отлитых - к фрезерованным, калёным и шлифованным зубчатым колесам. Параметры зубчатого зацепления уменьшались с достижением улучшения свойств материалов: чем выше были их механические характеристики, тем меньше становились габариты передачи. Цевочные, циклоидальные и эвольвентные зацепления следует считать классическими.

**Изменения в технологии производства зубчатых колес**

Ручная работа в производстве зубчатых колес, так же как и выполнение формы зубьев в отливках, не только была трудоемким процессом, но и не обеспечивала желаемого качества работы зацепления. До второй трети 19-го столетия для изготовления зубчатых колес вручную применяли деревянные модели, которые были очень дорогими (из-за необходимости обеспечить большое число зубьев с различным шагом) и к тому же неточными. Попытки механического воспроизведения зубчатого зацепления для часовых механизмов (1670 г. - Р. Гук, 1720 г. - М. Леффер) увенчались изобретением станков для нарезания силовых зубчатых колес (Х. Полемс в Швеции и Хиндли в Англии - около 1750 г.). Французский механик Ваукоусон в 1782 г. предложил конструкцию профильного дискового зубообрабатывающего инструмента. В 1836 году Виллис составил систему комплекта теоретически обоснованных Эйлером эвольвентных шестерен с общим углом для всех вариантов, равным  $14,5^{\circ}$ . Систему этого комплекта Бровн и Шарп в 1874 году положили в основу своих дисковых фрез.

Внедрение зубонарезных станков означало большой прогресс. До тех пор пока зубья не обрабатывали, их стороны оформляли по циклоиде. Когда стали обрабатывать поверхности зубьев, циклоидная форма оказалась непрактичной. Циклоидальное зацепление, которое было распространено при производстве зубчатых колес вручную, в промышленном производстве оказалось недолговечным.

Эвольвента, состоящая из одной единственной кривой, не только лучше позволяла получать форму зубьев фрезерованием, но и из-за невосприимчивости к осевому смещению обеспечивала большую точность передачи. Циклоидальное зацепление было почти полностью вытеснено из практики применения более технологичным эвольвентным, несмотря на преимущества выпукло-вогнутого профиля циклоидального зацепления в сравне-

нии с эвольвентным с позиции уменьшения износа.

Более ста лет спорили сторонники эвольвентной и циклоидальной форм зубьев. Преимущество циклоидальной формы заключается в большой нагрузочной способности поверхности зубьев колес вследствие увеличенной зоны контакта выпуклой и вогнутой сопряженных боковых поверхностей, но для изготовления таких колес требовалось в 2-3 раза больше режущего инструмента, чем для изготовления эвольвентных колес. Эвольвентный тип зацепления начал свое интенсивное развитие с конца 19-го века, когда бурно развивался капиталистический способ производства, положительно сказавшийся на практике изготовления зубчатых колес. Первый фрезерный станок для зубчатых колес, согласно работе Хумпаже от 7 августа 1908 г., был построен (предположительно) известным швейцарским инженером Бодмером, имеющим в Манчестере станкостроительный завод, в период между 1820 и 1830 годами.

В 1856 г. Кристиан Шиле Ольдхам получил английский патент на обработку прямозубых шестерён с помощью косо расположенной червячной фрезы. Георг Грант получил в декабре 1887 г. американский патент на станок, изготавливающий цилиндрические шестерни с помощью червячной фрезы. Станок с червячной фрезой был построен в 1893 г. в Гротон Фальс возле Нью-Йорка. Способ нарезания зубьев червячными фрезами получил название метода обкатки, в отличие от метода копирования дисковыми фрезами. Точным изготовлением зубьев достигалось некоторое снижение динамических нагрузок в зацеплении, что несколько уменьшало шум. Фридрихом Штольденбергом (1909 г.) использовался обкатной рубанок для изготовления цилиндрических шестерён. Он позволял получать высокую точность обработки, но требовал больших затрат времени. Его применение предпочтительно в тех случаях, где должна быть достигнута полнейшая завершённость.

## Изменения в конструкции зубчатого колеса и зубчатой передачи

Историко-технические структурные преобразования зубчатого зацепления можно выразить простой формулой: сложное изделие (цевочное зацепление) → простое изделие (примитивная отливка) → сложное изделие (зацепление металло-деревянное, кожаное и т.п.) → простое изделие (зацепление стальных обработанных колес).

К началу 20-х годов XIX в. выявилась тенденция к объединению исследований зубчатых механизмов. Например, в работах Борньи и Понселе много места отведено условиям их правильного конструирования: все части зацепления должны быть точно выполнены и точно собраны, оси валов должны быть строго перпендикулярны по отношению к колесам, зубья должны быть равными и находиться на равных расстояниях друг от друга; число зубьев должно быть большим, в связи с этим колеса должны быть по возможности большими, а оси - как можно меньшими, насколько это разрешают условия прочности; давление между зубьями ведущего и ведомого колес должно быть по возможности малым. Такие требования к зубчатой передаче были сформированы в начале XIX века.

На рубеже 19-го и 20-го столетий идея зубчатого зацепления через теорию и эмпирический конструктивно-технологический процесс его исполнения оформила зубчатую передачу в редуктор.

Это главный итог 1-го этапа 2-й стадии эволюции зубчатого зацепления.

В этих условиях процесс развития зубчатого зацепления перешел на новый, очень высокий качественный уровень. С этого времени начался 2-й этап 2-й стадии эволюции зубчатого зацепления, который продолжается по настоящее время и требует подробного анализа. Для 2-го этапа эволюции характерно развитие теории, технологии и практики эвольвентных зубчатых зацеплений, колес

и передач в их единстве, занявших доминирующую позицию в машиностроительном производстве.

Несовершенство эвольвентного зубчатого зацепления легло в основу создания систем корригирования, фланкирования и других способов модификации формы зубьев. Доминирующее в машиностроении зацепление с эвольвентной формой зубьев на 2-м эволюционном этапе получило необыкновенно качественное развитие (зацепления Л.А. Малкина, Э.Б. Вулгакова, А.К. Сидоренко), но за счет еще большего усложнения технологии его производства. Так как претензии к качеству эвольвентного зацепления сохранялись, то продолжался научно-технический творческий поиск, который изобретением зубчатого зацепления М.Л. Новикова в середине 20-го века привел к началу 3-го этапа 2-й стадии эволюции зубчатого зацепления.

Для 3-го этапа характерно появление других неклассических форм зубчатого зацепления: с учетом износа зубьев (В.В. Шульц, СССР), с пониженными шумовыми характеристиками (Э. Вильдгабер, США), а также с другие технические предложения. Для 3-го этапа характерно также технологическое противоречие в производстве новых типов зацеплений, связанное с необходимостью наличия нового инструмента и оснастки, с некоторыми оттенками инертности процесса организации производства. Мощная толерантность эвольвентного зацепления привела ряд специалистов к выводу, что следует повысить качество этого типа зацепления путем применения новых материалов для производства зубчатых колес, для их смазки, разработать новые способы смазки. В наше время наблюдается очень сильное замедление процесса развития формы зубьев.

## Классификация изменений зубчатого зацепления

Классификация изменений зубчатого зацепления представлена картиной его эволюции. 1-я точка технической бифур-

кации в развитии зубчатого зацепления (примерно 350 лет до н.э.) обоснована I-м основным классификационным признаком



изменений зубчатого зацепления - *по назначению* (функциональный признак) (силовое и приборное зубчатые зацепления). Это был I-й уровень эволюции зубчатого зацепления. Примитивные силовые зубчатые зацепления были сложными по конструкции составными деревянными изделиями. Во 2-й точке технической бифуркации (также примерно 350 лет до н.э.) изменения в силовых зубчатых зацеплениях обоснованы II-м основным классификационным признаком изменений зубчатого зацепления - *по конструкции исполнения* (конструктивный признак), повлиявшим на форму зубьев зацепления расположением осей колес в пространстве. Это был II-й уровень эволюции зубчатого зацепления. Для него характерно разделение силового зубчатого зацепления на конструкции с угловым и параллельным расположением зубьев. Цилиндрическое силовое зубчатое зацепление в 3-й точке технической бифуркации (примерно 150 лет до н.э.) имело элементы металлического и деревянного изделий. Это III-й основной классификационный признак изменений зубчатого зацепления - *по структуре исполнения зубчатого колеса* (морфологический признак), который определил III-й уровень эволюции зубчатого зацепления.

IV-й основной классификационный признак изменений зубчатого зацепления - *по форме зубьев* (теоретический признак). В основу изменения формы зубьев зацепления изначально были положены наблюдения и накопленный опыт. Теоретические основы формы профиля зубьев предвосхитили 4-ю точку технической бифуркации (17-18 века) на картине эволюции зубчатого зацепления. Здесь цилиндрическое силовое зубчатое зацепление выделило изделия, профиль зубьев которых был образован либо по циклоиде, либо по эвольвенте. Классическое циклоидальное зацепление получило развитие, а для эвольвентного зацепления началась стадия экспозиции - потребовалось определенное время для дальнейшего развития зубчатого зацепления. Эйлер создал теорию эвольвентного зацепления, но стадия экспозиции продолжалась до тех пор, пока не появились соответствующие условия, созданные

применением новых материалов, появлением и развитием соответствующего технологического оборудования.

Первые теоретические работы о зубчатом зацеплении определили IV-й уровень эволюции зубчатого зацепления и заложили основы будущей научной парадигмы. На этом уровне исполнение зубчатого зацепления определялось формой зубьев и структурой зацепления. Появились сложные виды зацеплений: металло-деревянные, кожаные. Применялись ранее неизвестные материалы (новотекс и др.).

V-й основной классификационный признак изменений зубчатого зацепления - *по способу изготовления* (технологический признак) - определил 5-ю точку технической бифуркации (1910 г.). Он выделил эвольвентное классическое зацепление в качестве доминирующего в промышленности. Развитие циклоидального классического зацепления очень замедлилось. Так появился V-й уровень эволюции зубчатого зацепления.

Недостатки эвольвентного зацепления, выявленные Эйлером, создателем его теории, а также обнаруженные практикой его производства и эксплуатации, привели к появлению различных систем коррекции и модификации формы зубьев, которые не дали желаемых специалистами результатов. Это стало причиной изобретения и развития неклассических видов зубчатых зацеплений, что отражает 6-я точка технической бифуркации (1960 г.). Начался VI-й уровень эволюции зубчатого зацепления, где выделен VI-й основной классификационный признак - *по надежности* (качественный признак). Классификация изменений зубчатых зацеплений представлена на рис. 1.

Зубчатые зацепления, представленные картиной эволюции, имеют несопоставимые характеристики и качественные показатели. Этот фактор неопределенности в статье преодолен тем, что разработаны интегральные показатели, качественно характеризующие развитие объекта ретроспективного исследования на разных стадиях и этапах его эволюции. Это интегральный индекс эволюции (J) зубчатого зацепления и интегральная матрица эво-

люции (М) зубчатого зацепления, которая содержит аналоги скорости эволюции (V)

каждого конкретного вида зубчатого зацепления.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ ЗАЦЕПЛЕНИЙ		
<b>I. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРИЗНАК – ПО НАЗНАЧЕНИЮ:</b>		
Для привода приборов		Для привода машин
<b>II. КОНСТРУКТИВНЫЙ ПРИЗНАК – ПО РАСПОЛОЖЕНИЮ ОСЕЙ КОЛЕС:</b>		
Угловое		Параллельное
<b>III. МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК – ПО СТРУКТУРЕ:</b>		
Простое изделие		Сложное изделие
<b>IV. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК – ПО ФОРМЕ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ:</b>		
Циклоидальный профиль		Эвольвентный профиль
<b>V. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК – ПО СПОСОБУ ПРОИЗВОДСТВА:</b>		
Копированием	Матрицей	Огибанием
<b>VI. КАЧЕСТВЕННЫЙ ПРИЗНАК – ПО НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ:</b>		
Изменения циклоидального зацепления	Изменения эвольвентного зацепления	Изобретение неклассических форм зубьев

Рис. 1. Классификация изменений зубчатых зацеплений

Интегральный индекс эволюции зубчатого зацепления в абсолютной неограниченной шкале показывает, во сколько раз общий период эволюции всех видов зубчатых зацеплений ( $L_{\Sigma}$ ) превышает эволюцию конкретного зубчатого зацепления. Например, для примитивного зацепления с периодом эволюции  $L_{Пр}$  имеем:

$$J_{Пр} = \frac{L_{\Sigma}}{L_{Пр}} = \frac{2350}{2000} = 1,175.$$

Отношение индексов (J) разных видов зацеплений качественно характеризует аналог скорости эволюции конкретного зубчатого зацепления. Например, для за-

цеплений с примитивной ( $J_{Пр}$ ) и циклоидальной ( $J_{Ц}$ ) формами зубьев имеем:

$$V_{Ц}^{Пр} = \frac{J_{Пр}}{J_{Ц}} = \frac{1,175}{5,875} = 0,2.$$

Результаты сравнительной характеристики процесса эволюции зацеплений с разной формой зубьев и в разные историко-технические периоды представлены на рис. 2 графиком изменений интегральных индексов эволюции (J) и матрицей эволюции (M) аналогов скоростей эволюции (V) всех видов зубчатых зацеплений.

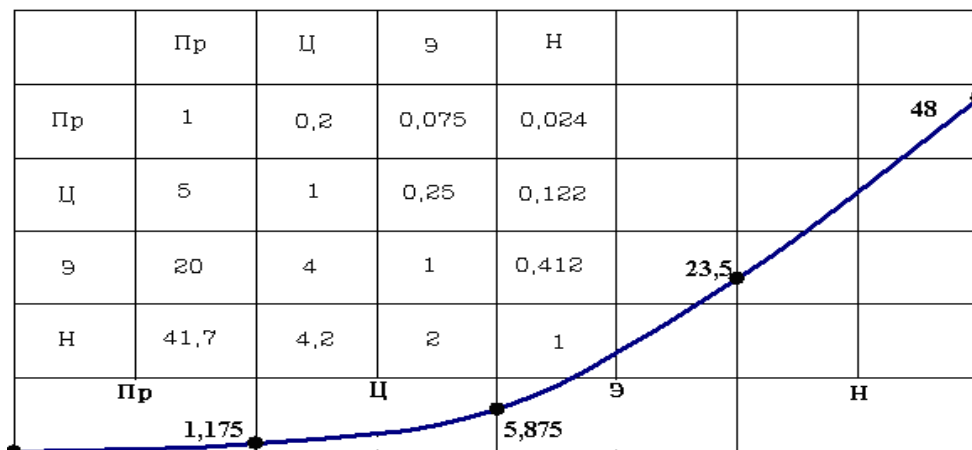


Рис. 2. Интегральные индексы и матрица эволюции зубчатых зацеплений: Пр – примитивного; Ц – циклоидального; Э – эвольвентного; Н – Новикова

## Заключение

Эволюционное ускорение в развитии зубчатых зацеплений обосновано интеллектуальной активностью инженеров и научно-техническим прогрессом. Доминирует зацепление с эвольвентной формой профиля зубьев. Эта форма зубьев достигла в своем развитии стадии насыщения. Созданная картина эволюции зубчатого зацепления, разработанная классификация изменений в зубчатом зацеплении и предложенные интегральные показатели для сравнительной характеристики эволюции зубчатых зацеплений на разных стадиях и этапах развития показали следующее:

1. На качество работы зубчатого за-

цепления повлияли: изменения формы профиля зубьев; конструктивное расположение зубьев относительно осей колес; характеристики контактирующих материалов; структура зубчатых колес; эволюция конструкции редуктора и технологии производства.

2. Углубленного исследования и анализа требуют факторы, обеспечивающие качество современного зубчатого зацепления: процесс модификации формы зубьев; текстура рабочей поверхности зубьев; влияние третьего тела в контакте.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титенок, И.А. История развития зубчатого зацепления: монография / И.А. Титенок. - Брянск: Исток-ЛТД, 2007. - 55 с.
2. Титенок, И.А. История модификации эвольвентного зацепления: монография / И.А. Титенок. - Брянск: Исток-ЛТД, 2007. - 50 с.
3. Титенок, И.А. Внешнее цилиндрическое силовое зубчатое зацепление: этапы развития, состояние, перспектива: монография / И.А. Титенок. - Брянск: Брянск. обл. полигр. объединение, 2009. - 26 с.
4. Титенок, И.А. Концепция повышения эффективности эвольвентного зубчатого зацепления /

И.А. Титенок // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - № 3 (19). - С. 38-45.

5. Пат. 31157 на полез. модель, МКИ<sup>3</sup> F 16 H 57/04. Зубчатая передача / Титенок И.А. - Заявл. 09.12.02; опубл. 20.07.03, Бюл. № 20.
6. Пат. 85966 на полез. модель, МПК<sup>7</sup> F 16H 57/04. Зубчатая передача / Титенок И.А. - Опубл. 20.08.09, Бюл. № 23.
7. Пат. 85967 на полез. модель, МПК<sup>7</sup> F 16H 57/04. Зубчатая передача / Титенок И.А. - Опубл. 20.08.09, Бюл. № 23.

1. Titenok, I.A. *History of Gearing Development*: monograph / I.A. Titenok. - Bryansk: Istok-LTD, 2007. - pp. 55.
2. Titenok, I.A. *History of Involute Gearing Modification*: monograph / I.A. Titenok. - Bryansk: Istok-LTD, 2007. - pp. 50.
3. Titenok, I.A. *External Cylindrical Power Gearing: Development Stages, State, Outlook*: monograph / I.A. Titenok. - Bryansk: Bryansk Regional Printing Association, 2009. - pp. 26.
4. Titenok, I.A. Concept of involute gearing efficiency increase / I.A. Titenok // *Bulletin of Bryansk State*

*Technical University*. - 2008. - No.3 (19). - pp. 38-45.

5. Pat. 31157 for Utility Model, ICI F 16 H 57/04. *Gearing* / Titenok I.A. - Appl. 09.12.02; published 20.07.03, Bull. No.20.
6. Pat. 85966 for Utility Model, IPC F 16H 57/04. *Gearing* / Titenok I.A. - published. 20.08.09, Bull. No.23.
7. Pat. 85967 for Utility Model, IPC F 16H 57/04. *Gearing* / Titenok I.A. - Published. 20.08.09, Bull. No.23.

*Статья поступила в редколлегию 28.06.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Киричек А.В.*

## Сведения об авторах:

**Титенок Игорь Александрович**, инженер по группе изделий ООО «АББ» (г. Москва), историк

науки и техники, e-mail: [Elproekt-it@yandex.ru](mailto:Elproekt-it@yandex.ru).

**Titenok Igor Alexandrovich**, Engineer of Product Group PC "ABB" (Moscow), Historian of Science and

Engineering, e-mail: [Elproekt-it@yandex.ru](mailto:Elproekt-it@yandex.ru).