

мообразования соответствующих числу отображений аффинного пространства.

3. Предложена модель перехода от кинематических схем формообразования к схеме компоновки станков.

В дальнейшем необходимо провести классификацию кинематических схем и математических моделей формообразования зубчатых передач для трех отображений аффинного пространства, а также уточнить библиотеки исходных формообразующих звеньев, заготовок формообразуемых звеньев и геометро-кинематических схем формообразования.

**Список литературы:** 1. Тернюк Н.Э., Ковалюх В.Р., Наседкин Ю.В. Способы обработки сферических зубчатых колес. – в кн. Современные проблемы резания инструментами из сверхтвердых материалов: Тез. докл. всесоюз. Конф. – Харьков, 1981. – С.46-49. 2. Ткач П.Н. Синтез высоконагруженных цилиндрических передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями по геометро-кинематическим критериям. – канд.техн.наук. – Луганск, 2004. – 255с. 3. Анкин Ю.В. Синусоидальное зацепление, основы геометро-кинематической теории. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1975. – 64с. 4. Кириченко А.Ф., Матюшенко Н.В., Павлов А.И. Совершенствование зацепления Новикова. // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков, 2003. – Вып.7, том 2. – С.58-59. 5. Сильч А.А. Геометрический расчет цилиндрических передач Новикова. – Курган: Изд-во Курганского ун-та. – 2001. – 84с. 6. Цейс Ю.В. Профилирование режущего обкатного инструмента. – М.: Машгиз, 1961. – 156с. 7. Ерихов М.Л. Принципы систематики, методы анализа и вопросы синтеза зубчатых зацеплений Дис. ... докт.техн.наук. – Хабаровск. 1972 – 324с. 8. Шевелева Г.А. Теория формообразования и контакта движущихся тел: монография. – М.: Изд-во "Станки", 1999. – 494с. 9. Бабичев Д.Т. Основы альтернативной теории формообразования, базирующейся на новых геометрических понятиях // Международная конференция "Техника проводов 03": Секция 1. Теория, расчет и конструирование трансмиссионных элементов. докл. 1-58. – Болгария: София. – 2003. – С.270-275. – ISBN 954-90272-95. 10. Кривошея А.В., Сторчак М.Г., Данильченко Ю.М., Кривошея В.В. Обобщенная классификация кинематических схем формообразования зубчатых колес // Високи технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць НТУ "ХПИ". – Харків, 2006. – Вып.2(13). – С.48-69. 11. Кривошея А.В., Данильченко Ю.М., Сторчак М.Г., Мельник В.Е. Совершенствование обобщенной унифицированной математической модели формообразования и обработки зубчатых колес // Оборудование и инструмент. – №4. – 2010. – С.46-51. 12. Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Сторчак М.Г. Проектирование формообразующего оборудования и инструментальных систем для обработки зубчатых колес // Международный симпозиум "Теория и практика зубчатых передач-2014". – Ижевск, 20-21 января 2014. – С.484-489. 13. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием. – Киев: Выща школа. 1981. – 152с. 14. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1975. – 391с. 15. Перепелица Б.А. Отображения аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. – Харьков: Выща школа, 1981. – 152с. 16. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ. – Киев: Выща школа. – 192с. 17. Коновалов Г.Г. Основы новых способов металлообработки. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 297с. 18. Грановский Г.И. Кинематика резания. – М.: Машгиз. 1948. – 199с. 19. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Ж.А., Гера, Хамуйела Т.О. Морфологический синтез станков и их механизмов: Монография – К.: ООО "Гнозис", 2012 – 416с. 20. Реиетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336с.

Поступила (received) 20.03.2014

УДК 621.9

**Н.Н. КУЗЬМЕНКО**, к.т.н., доцент каф. метрологии ВНУ им. В. Даля, Луганск

## ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГЛОБОИДНОГО СТАНОЧНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

В статье рассмотрены существующие глобоидные зубчатые передачи, применяемые в различных областях машиностроения, предложено формообразование принципиально нового станочного зацепления квазиглобоидного червяка с цилиндрическим колесом, что позволяет получить линейный контакт касания при любом передаточном отношении, и снижает себестоимость изготовления зубчатых колес.

**Ключевые слова:** формообразование, квазиглобоидный червяк, передаточное отношение, станочное зацепление, глобоидная передача.

© Н.Н. Кузьменко, 2014

## Актуальность задачи.

Несущую способность червячных передач можно повысить, если увеличить число витков червяка, сопрягающихся с червячным колесом, и расположить их на глобоидной поверхности (см. рисунок 1) [1-4]. При этом контактные линии в зацеплении располагаются под большим углом к скорости скольжения, что улучшает условия для образования масляных клиньев в зацеплении. Такие передачи называют глобоидными. Их несущая способность при условии точного изготовления и надлежащего охлаждения существенно больше, чем передач с цилиндрическими червяками, зато изготовление и сборка их несколько сложнее [6].

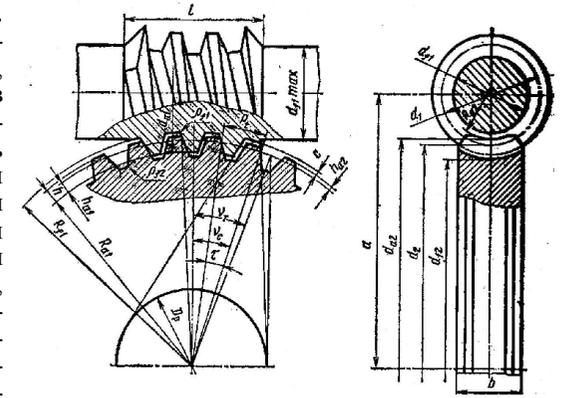


Рисунок 1 – Схема глобоидной передачи

**Основная часть.** Геометрические расчеты глобоидных передач подобны расчетам червячных передач с цилиндрическим червяком.

В качестве основных геометрических параметров стандартизованы межосевые расстояния  $a$ , диаметры окружности выступов  $d_{a2}$  и ширины  $b$  червячных колес. Это позволяет сократить номенклатуру наиболее дорогих деталей: корпусов и заготовок колес. Стандартизованы также кинематические параметры: передаточные числа и числа зубьев, что важно для сокращения номенклатуры глобоидных фрез. Стандартизация модуля не привела бы к сокращению комплекта инструмента, так как одной глобоидной фрезой все равно нельзя нарезать колеса с разными числами зубьев. Поэтому модули не стандартизируют, и они могут быть дробными.

Профили зубьев червяка в осевом сечении очерчиваются прямыми, касательными к профильной окружности. Диаметр профильной окружности  $D_p = a/1,6$  округляют до 25; 31,5; 40мм и далее по ряду межосевых расстояний.

Рассматриваемым червячным глобоидным передачам, как и цилиндрическим червячным передачам с любым профилем присущ один и тот же недостаток – искажение профиля зубьев в результате переточек червячной фрезы или инструментального зубчатого колеса. Иными словами, необходимо добиться того, чтобы червячная фреза или инструментальное зубчатое колесо по своим размерам и профилю соответствовали червяку или зубчатому колесу, с которым должно работать нарезаемое червячное колесо или червяк. Задача исключительно сложная.

Для получения высококачественного зацепления элементов червячной передачи необходимо, чтобы червячная фреза по своим размерам и профилю соответствовала червяку, с которым должно работать нарезаемое ею червячное колесо. Или, другими словами, червячная фреза должна быть копией основного червяка [6].

Каждые вновь изготовленные червячная фреза или инструментальное цилиндрическое колесо удовлетворяют этому требованию только до первой заточки. Заточка затылованной фрезы уменьшает ее диаметр, приближая профиль режущих кромок зубьев к ее оси.

Последнее при нормальной настройке станка вызывает уменьшение высоты зубьев нарезаемого червячного колеса, что исключает возможность правильного зацепления его с червяком, изготовленным по размерам чертежа [3].

Отмеченный недостаток устраняется путем приближения оси червячного коле-

са к оси фрезы на половину величины уменьшения диаметра фрезы после переточки.

Уменьшение межосевого расстояния вместе с уменьшением диаметра фрезы и связанным с этим изменением углов подъема винтовых линий фрезы и зубьев червячного колеса приводит к искажению профиля рабочих поверхностей зубьев.

С увеличением угла подъема червяка эти ошибки и искажения возрастают, особенно резко сказываясь на качестве зацепления и работе многозаходных червячных пар.

Для ослабления отмеченных недостатков существует много способов. Все они могут быть подразделены на две группы: 1) способы, направленные на компенсацию ошибок, вызываемых переточкой червячных фрез и цилиндрических инструментальных колес; 2) способы, направленные на устранение причин, порождающих появление этих ошибок.

Из теории зацеплений известно, что производящий червяк, производящее цилиндрическое колесо являются воображаемыми червяками, воображаемыми цилиндрическими колесами, которые описываются режущими кромками искомым инструментом. Режущие кромки получаются в результате пересечения двух плоскостей: передней плоскости, получаемой в результате заточки и задней плоскости, получаемой в результате затылования. Эти две плоскости являются очень сложными. Передняя плоскость должна быть заточена под углом  $\delta=0^\circ$  (в противном случае получают геометрические искажения). При этом угле процесс резания обычно неудовлетворительный. Из теории резания известно, что угол  $\delta$  должен быть в пределах  $\delta \pm 30^\circ$  в зависимости от обрабатываемого материала и его твердости, а также твердости режущего инструмента [6].

Рассмотрим затылования червячных фрез и цилиндрических инструментальных колес. Это выполним через определения формы задней поверхности червячных фрез.

Форма задней поверхности червячной фрезы должна быть такой, чтобы: а) во всех точках ее режущих кромок были обеспечены необходимые для работы фрезы задние углы; б) после переточки фрезы каждая ее режущая кромка лежала на поверхности основного червяка; в) выполнялись требования технологичности.

Подход к проектированию формы задней поверхности червячной фрезы в значительной мере зависит от того, имеется ли у фрезы возможность регулирования положения режущих кромок после переточки ее зубьев. Если конструкция фрезы позволяет после каждой переточки восстанавливать положение режущей кромки на поверхности основного червяка (путем перемещения зубьев), то в этом случае задняя поверхность зубьев фрезы должна быть такой, чтобы после каждой переточки форма режущей кромки оставалась без изменения. Для выполнения этого требования достаточно, чтобы задняя поверхность представляла собой одну из поверхностей, допускающих движение самих по себе, то есть или поверхность вращения, или винтовую поверхность, или цилиндрическую.

В большинстве случаев конструкция фрезы не допускает регулирования положения зубьев, и поэтому после каждой переточки за счет заднего угла ее наружный, а следовательно, и начальный радиусы уменьшаются. Уменьшение радиуса приводит к тому, что после каждой переточки меняется теоретически требуемая форма передней поверхности (если она винтовая) и форма основного червяка. Вследствие этого для получения заданной формы зубчатой детали каждая режущая кромка фрезы как линия пересечения передней и задней поверхностей после каждой переточки должна иметь различную форму (см. рисунок 2). Если одноименные точки этих режущих кромок соединить линиями, то тогда задняя поверхность фрезы будет определяться сетью координатных линий, составленной из режущих кромок (форма которых различна), и линий, соединяющих одноименные точки режущих кромок

(форма этих линий также различна).

Полученную поверхность можно обработать только таким затылующим инструментом (резцом, шлифовальным кругом и др.), который будет иметь с ней точечный контакт, причем инструмент в процессе обработки должен совершать движения, рассчитанные в зависимости от формы ее координатных линий. Последнее выполнить очень сложно. В частности, на обычных затыловочных станках указанные движения осуществить нельзя, так как затылующий инструмент управляется только одним кулачком. Получить такую форму задней поверхности зуба червячной фрезы каким-либо затылующим инструментом при его линейном контакте с этой поверхностью нельзя даже теоретически. Поэтому все применяемые в настоящее время способы получения задней поверхности зубьев червячной фрезы являются приближенными [6].

Каждый из этих способов предусматривает, что теоретически точную заднюю поверхность червячной фрезы можно заменить другой поверхностью, которая более удобна в технологическом отношении, а по форме мало отличается от теоретически точной задней поверхности. Подбор заменяющей поверхности в каждом конкретном случае обработки детали достигается частичным изменением формы режущих кромок червячной фрезы, формы кривой затылования, направления затылования, профиля и положения затылующего инструмента. Окончательным инструментом, затылующим заднюю поверхность червячной фрезы, является, как правило, шлифовальный круг. Поэтому в качестве заменяющей поверхности желательно брать такую, которую можно получить производящей поверхностью шлифовального круга и легко контролировать. С этой технологической точки зрения наиболее близко к теоретической форме задней поверхности червячной фрезы подходит винтовая поверхность.

Искомый затылованный инструмент был заменен на незатылованный, что позволило повысить точность и снизить затраты на изготовление зубчатых колес.

На рисунке 3 показана схема формообразования квазиглобоидного червяка (колеса) 1 незатылованным производящим инструментальным колесом 2. Квазиглобоидный профиль был получен при помощи круглого эвольвентного инструментального колеса. Это колесо не затылуется или остро не затачивается и имеет передний угол  $\delta = \pm 30^\circ$ , который зависит от обрабатываемого материала и его твердости, а также твердости инструмента. Задние углы  $\gamma_3$  получаются автоматически

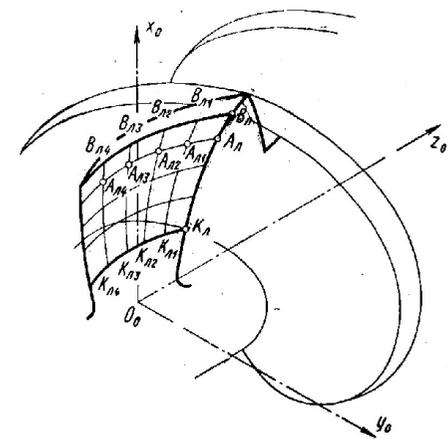


Рисунок 2 – Сеть координатных линий на боковой затылованной поверхности червячной фрезы

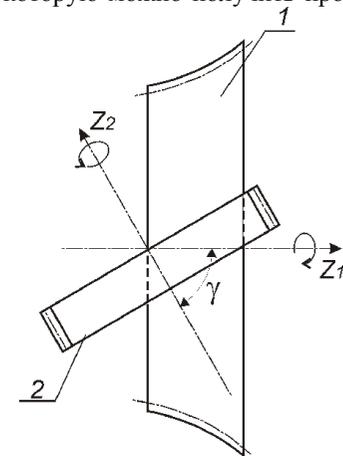


Рисунок 3 – Схема формообразования квазиглобоидной заготовки и квазиглобоидного червяка (колеса)

ски и зависят от угла  $\beta$  и линейного размера  $h$ . В свою очередь, величина угла  $\beta$  и линейный размер  $h$  зависят от конструктора машин, куда входит рассматриваемая зубчатая передача, то есть зависят от диаметра выбранной квазиглобoidной заготовки в горловом сечении и выбранной величины  $h$ , которая зависит от угла  $\beta$ .

При формообразовании квазиглобoidной заготовки круговая режущая кромка описывает цилиндрическую производящую поверхность. Диаметр круговой режущей кромки равен наружному диаметру цилиндрического прямозубого колеса за вычетом  $4,5m_n$ . Задние углы на инструментальном цилиндрическом колесе равны  $0^\circ$ , т. е. затыловка или острая заточка отсутствуют.

**Вывод.** В аналитическом виде получено станочное квазиглобoidное зубчатое зацепление с линейным контактом между цилиндрическим эвольвентным колесом и нарезаемым квазиглобoidным неэвольвентным колесом. Предложенная схема формообразования квазиглобoidных витков (зубьев) незатылованным режущим инструментом позволяет получить линейный контакт при любом передаточном отношении и снижает себестоимость изготовления зубчатых колес на 60%.

**Список литературы:** 1. Детали машин. Расчет и конструирование: Справочник / Биргер И.А., Борович Л.С., Громан М.Б. и др. – М.: Машиностроение, 1968. – Т.1. – 440с. 2. Витренко А.Н. Исследование геометрии и кинематики цилиндрико-гиперболоидных передач: Дисс... канд.техн. наук: 01.02.02. – Ворошиловград, 1975. – 214с. 3. Кириченко И.А. Гиперболоидная зубчатая передача, полученная цилиндрической производящей поверхностью: 36 научных работ. – Краматорськ: Вид-во ДДМА. – Вып.11. – 2001. – С.129-133. 4. Колчин Н.И., Литвин Ф.Л. Методы расчета при изготовлении и контроле зубчатых изделий. – М.: Машгиз, 1952.- 269с. 5. Производство зубчатых колес: Справочник / С.Н. Калашиников, А.С. Калашиников, Г.И. Коган и др.; под общ. ред. Б.А. Тайца. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 464с.

*Поступила (received) 30.03.2014*

УДК 539.3

**А.В. ЛИТВИНЕНКО**, директор ООО "НИЦ УК "РТХ", Мариуполь;  
**Р.И. ШЕЙЧЕНКО**, начальник сектора Представительства "УК "РТХ";  
**Р.В. ГРАБОРОВ**, ведущий инженер Представительства "УК "РТХ";  
**М.А. БОНДАРЕНКО**, студентка НТУ "ХПИ"

### **МЕТОД ЛИНЕАРИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА В ЗАДАЧЕ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В статье предложен метод линеаризации поверхности отклика в задаче обоснования проектных параметров тонкостенных элементов машиностроительных конструкций. Он состоит в представлении целевой функции и ограничений в виде линейных форм от варьируемых параметров. Коэффициенты этих форм вычисляются на основе конечно-разностной аппроксимации. Рациональные параметры проектируемых конструкций определяются путем использования полученных аппроксимационных зависимостей. Далее, приняв в качестве исходной точки полученный набор параметров, производится следующий этап уточнения аппроксимационных зависимостей. После этого процесс уточнения повторяется на основе уже улучшенного аппроксимационного представления функций качества и ограничений. В результате многократного повторения этой процедуры получается более точное решение задачи по сравнению с традиционными одноэтапными процедурами. При этом на каждом шаге (этапе) все операции производятся с линеаризованными функциями, что существенно ускоряет процесс поиска параметров, удовлетворяющих текущим критериям и ограничениям.

**Ключевые слова:** линеаризация, тонкостенный элемент, бронекорпус, вагон, цистерна, автобус, напряженно-деформированное состояние, собственная частота колебаний, устойчивость, поверхность отклика.

**Введение.** В настоящее время проектируется и изготавливается большое количество тонкостенных машиностроительных конструкций, находящихся в условиях эксплуатации, которые сильно изменяются в зависимости от различных факторов. При этом важно, что различные факторы влияют на интенсивность нагрузок, на нагрузочную способность и долговечность различным образом. Так, при действии усилий от ветровой нагрузки получается стохастическое распределение аэродинамических усилий. Такой же характер носят и распределения нагрузок, возникающих при движении транспортных средств по автомобильным дорогам и железнодорожным путям, хотя их характеристики и природа возникновения отличны от выше упомянутых. Те же аргументы можно отнести и к таким нагрузкам как технологические, контактные, сейсмические и т.п.

Устоявшаяся практика расчета машиностроительных конструкций в этом случае состоит в определении нескольких типов характерных нагрузок: экстремальных, номинальных, изменяемых в определенном диапазоне по некоторому закону распределения и т.п. Далее расчет производится по каждому типу режимов нагружения с установлением того или иного критерия и ограничения (по прочности, жесткости, массе и т.п.).

Основным недостатком перечисленных подходов является привязка к тому или иному набору конкретных значений параметров. Отвлекаясь от степени обоснованности применяемой методики для расчета физико-механических процессов и состояний, именно фактор невариативности параметров следует принять наиболее значимым препятствием для процедуры синтеза рациональных параметров проектируемых тонкостенных машиностроительных конструкций. Это объясняется тем, что варьирование одних и тех же параметров по-разному сказывается на изменении их оптимальных значений по различным критериям и ограничениям (в зависимости от типа расчета, режима, процесса и т.п.). Учитывая в дополнение также и то обстоятельство, что результирующие поверхности отклика (т. е. значения некоторых характеристик, получаемых в результате расчетов и важных с точки зрения функционирования проектируемой конструкции) в общем случае описываются нелинейными функциями параметров, получаем в итоге очень сложную многослойную задачу синтеза. В свою очередь это резко снижает эффективность решения задач обоснования рациональных параметров тонкостенных машиностроительных конструкций. Этот недостаток еще более усугубляется тем обстоятельством, что сами критерии, ограничения, структура исследуемой конструкции являются изменяемыми уже в ходе выполнения проектных разработок. В результате получаемые решения задач синтеза теряют свое значение с практической точки зрения, а, значит, безрезультатно затрачиваются вычислительные, финансовые и временные ресурсы.

**Анализ существующих методов.** Для устранения указанного противоречия предлагается несколько путей. Самый простой, но затратный, состоит в предварительном исследовании как можно большего количества возможных вариантов проектных решений и конструктивных параметров. Эта задача в силу лавинообразного роста массива информации зачастую не под силу даже при наличии больших вычислительных ресурсов. Оправданным такой путь [1-4] является либо на первых этапах проектирования для выбора концептуальных решений, либо для конструкций с минимальным количеством варьируемых параметров. Второй из возможных путей предусматривает применение для решения поставленной задачи известных или новых и усовершенствованных методов оптимизации [5-11]. Алгоритмы оптимизации, их реализующие, в настоящее время встраиваются в современные пакеты конечно-элементного анализа