

УДК 621.9.06

## ИССЛЕДОВАНИЕ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ ПРИВОДА ПОДАЧ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Кроль О.С., Фиронов Д.В., Великоцкий В.В.

## RESEARCH AND 3D-MODELLING OF WORM GEAR OF THE FEED DRIVE FOR THE WORKING CENTER

Krol O., Fironov D., Velikotsky V.

*В статье проведено исследование конструкции и геометрии червячной передачи. Предложена модифицированная процедура компьютерного профилирования рабочих поверхностей зуба червячного колеса. Осуществлен силовой и геометрический расчеты червячной передачи в модуле АРМ Trans. Выполнено исследование напряженно-деформированного состояния контактных поверхностей червяка методом конечных элементов с использованием модуля АРМ FEM. Построены 3D-модели червячной передачи, используемой в механизме поворота обрабатывающего центра ОЦЗВ в интегрированной САПР КОМПАС-3D.*

**Ключевые слова:** червячная передача, обрабатывающий центр, механизм поворота, 3D- модель

**Введение.** Для обеспечения производительной работы поворотного стола обрабатывающего центра важно использовать такие червячные передачи, которые реализуют: повышенную (до 2 нм) точность позиционирования при использовании систем коррекции; точность реверсирования, способствующую динамической компенсации погрешностей; снижение возмущающих воздействий от привода стола.

**Постановка проблемы.** Процесс проектирования механических передач, выполняемый в среде современных САПР имеет ряд особенностей. Во-первых, зачастую для этого используются специализированные модули, встраиваемые в контур системы автоматизированного проектирования. Во-вторых используются возможности прикладных библиотек САПР, которые все шире применяют инструментарий параметризации. При построении 3D-модели червячной передачи следует учитывать определенные ограничения 3D-процедур, используемых в современных САПР. Не смотря на то, с помощью инструментария 3D-моделирования

возможно профилирование ряда передач с достаточно высокой точностью визуализации рабочих поверхностей (цилиндрические зубчатые колеса, шкивы и т. д.) проблемы эффективного профилирования зуба сохраняются.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросы геометрии и кинематики, червячных передач с цилиндрическим червяком рассматриваются в различных литературных источниках. Например, в работах [1, 2, 3] изложены общие вопросы геометрии и кинематики червячных передач. Исследование контактных линий и кривизны контактирующих поверхностей представлено в [4, 5]. Проблемы повышения грузоподъемности и КПД червячных передач освещены в работах [6, 7].

Вместе с тем для реализации комплексных расчетов основных элементов привода поворотного стола необходимо применение развитого инструментария современных систем проектирования с использованием методов конечных элементов для полного представления о полях напряжений и перемещений в пространстве 3D [8, 9, 10].

**Цель статьи.** Повышение эффективности процедур проектирования автоматизированного проектирования за счет применения средств 3D-моделирования, элементов компьютерного профилирования и расчетных модулей САПР АРМ WinMachine.

**Результаты исследований.** В качестве исследуемого объекта рассмотрим привод поворота стола обрабатывающего центра фрезерно-сверлильно-расточного типа [11, 12, 13] Этот привод входит в состав привода подач, который для современных станков с ЧПУ может быть выполнен в соответствии со следующей структурной схемой :

1. Схема с жесткой связью электродвигателя и ходового винта передачи винт-гайка качения;
2. Схема с одноступенчатым редуктором и выборкой зазора в зубчатом зацеплении;
3. Схема с применением безззорной червячной и реечной передач (рис.1)

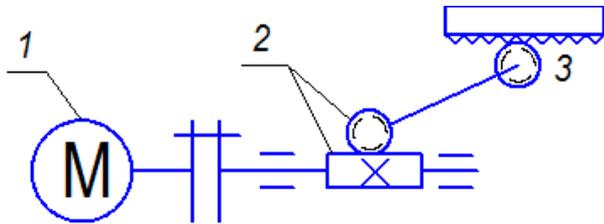


Рис. 1. Схема привода с червячной и реечной передачами:  
 1 – электродвигатель; 2 – червячная передача;  
 3 – реечная передача

Привод поворота обрабатывающего центра ОЦЗВ выполнен по третьей схеме и функционирует следующим образом (рис.2)

Встроенный поворотно-делительный стол позволяет осуществлять обработку детали с фиксацией стола в 360 положениях, т.е. через один градус и контурную обработку с помощью круговой подачи в пределах одного оборота планшайбы. Круговая подача стола проводится при расфиксированном положении планшайбы. Масло

подается в нижнюю полость гидроцилиндра. При этом стакан перемещается вверх и выводит из зацепления верхнее делительное зубчатое колесо с нижним делительным плоскозубчатым колесом, жестко связанным с планшайбой. Планшайба получает круговое движение от электродвигателя постоянного тока 9 через зубчатые колеса 10 и 11, червяк 12 и червячное колесо 13.

В кинематике поворотного стола механизм автоматического создания и выбора люфта за счет применения 2-х параллельных, перемещающихся в осевом направлении (плавающих) червячных валов.

При круговой подаче, когда необходимо обеспечить безлюфтовую передачу, люфт выбирается следующим образом: масло подается в полость гидроцилиндров, при этом витки червяков поджимаются к виткам червячного колеса, тем самым устраняется люфт в червячной передаче.

Для обеспечения точного позиционирования планшайбы давление в полости цилиндра сбрасывается, давая возможность перемещаться червякам в осевом направлении. При этом червячное колесо и жестко соединенное с ним нижнее делительное колесо получает возможность провернуться на угол погрешности позиционирования и точно зафиксироваться относительно верхнего недвижимого делительного колеса 5.

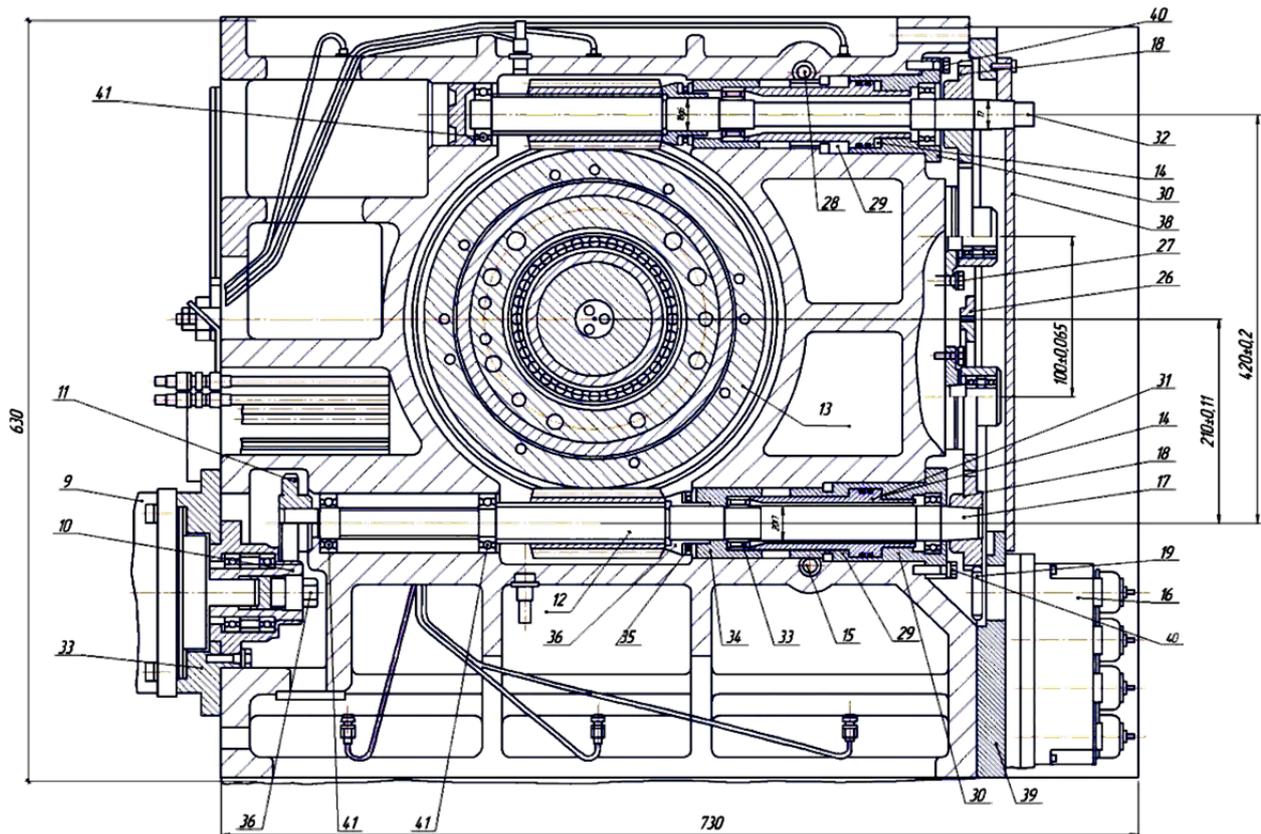


Рис. 2. Привод поворота стола

В гидроцилиндрах поджима червячных валов имеется зубчатые колеса [14, 15, 16], торцы которых со стороны резьбы служат регулируемыми упорами для устранения люфта в червячной передаче за счет осевого поджима двух червяков, перемещающихся по шлицам валов. Перемещение упоров в осевом направлении осуществляется вращением двух червяков в нужном направлении.

При помощи круглого поворотного стола можно фрезеровать как наружные контуры так и внутренние пазы. Так, контур дуги образуется без комбинирования двух подач, а только в результате круговой подачи поворотного стола и, как следствие, точность контура не будет определяться процедурой комбинирования двух подач, а будет регламентироваться погрешностями установки заготовки на столе.

К кинематическим характеристикам привода подач относится скорость привода планшайбы, которая соответствует скорости на червячном колесе, зависящей от передаточного числа и характеристик червячной передачи. Эта передача оказывает решающее воздействие на конечную точность обработки.

Для исследования свойств червячной передачи разработана 3D-модель поворотного стола (рис.3,а) и червячной передачи (рис.3,б,в, г) [17, 18, 19]

При построении 3D-модели червячной передачи следует учитывать определенные ограничения 3D-процедур, используемых в современных САПР. Не смотря на то, с помощью инструментария 3D-моделирования возможно профилирование некоторых видов передач с

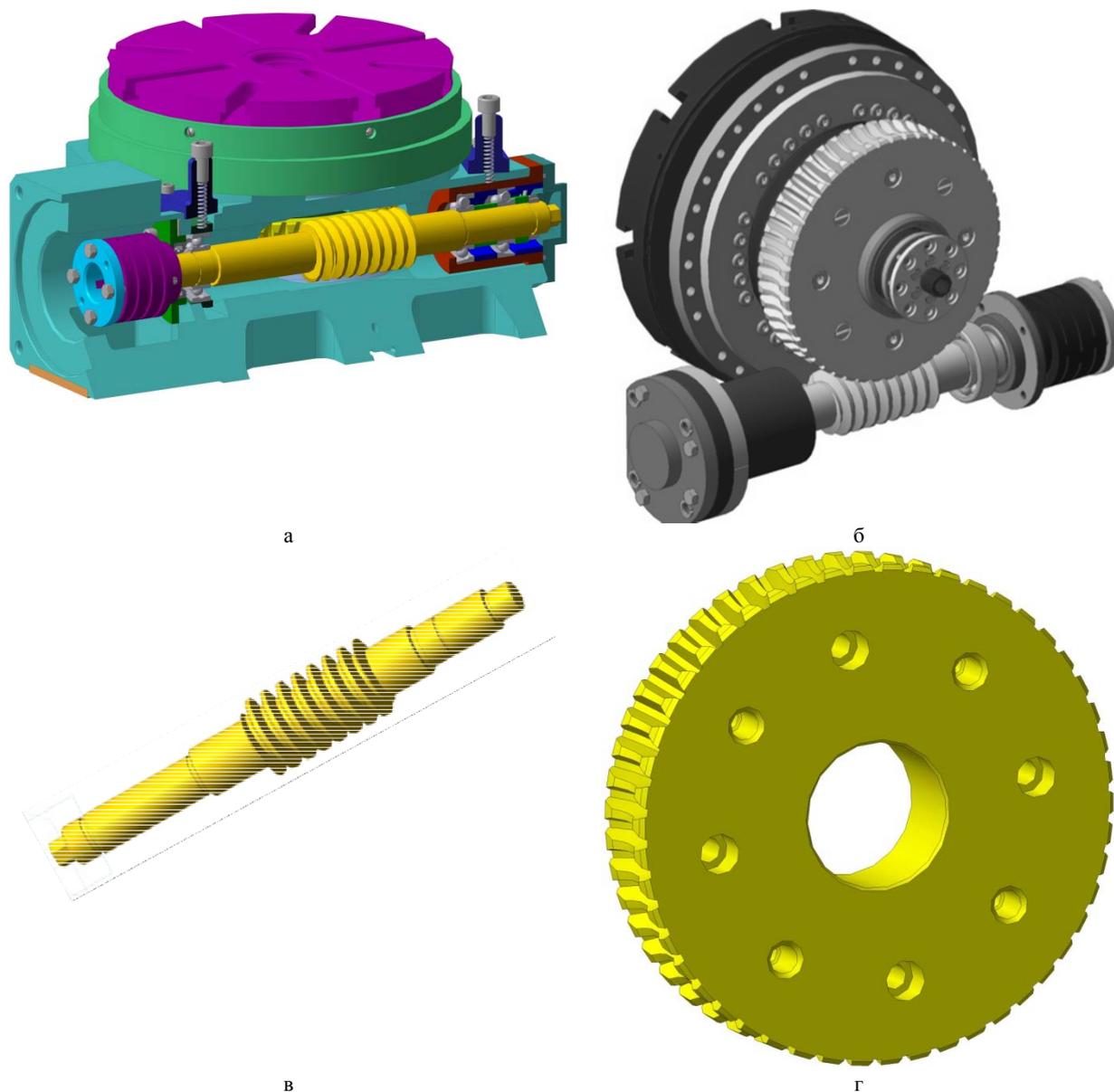


Рис.3. 3D-модель поворотного стола:  
а – сечение поворотного стола; б – червячная передача; в – червяк; г – червячное колесо

достаточно высокой точностью визуализации рабочих поверхностей (цилиндрические зубчатые колеса, шкивы и т. д.). При моделировании конических зубчатых колес с круговым зубом и червячных колес визуализация далеко не полная – зубья (а точнее – впадины между ними) система не генерирует, поэтому такие модели являются весьма условными. Для получения полноценной 3D – модели червячного колеса нужно применить иные методы моделирования, один из которых представлен ниже на примере САПР КОМПАС 3D [17, 18, 19].

Профилирование зуба происходит путем вырезания впадины, как это реализуется в процессе нарезания зубьев на зуборезном станке. Трехмерная операция «Вырезание» осуществляется по построенным и упорядоченным в определенном положении торцовым сечениям при помощи команды «Вырезать элемент по сечениям». При этом следует учитывать ряд особенностей круговых зубьев:

1. Вдоль впадины зуба не сохраняется геометрическое подобие профилей (сечение постоянно изменяется по форме и размерам).

2. Траектория расположения сечений очерчивается винтовой поверхностью, поэтому сечения занимают сложные пространственные положения.

Для решения данной задачи предлагается следующая последовательность действий:

3. Определение пространственного положения торцовых сечений (плоскостей, на которых они строятся);

4. Расчет дополнительных геометрических параметров червячного колеса, на основании которых строятся торцовые сечения;

5. Построение сечений;

6. Собственно вырезание.

На рис.4 показано операции построения эвольвент боковых поверхностей зуба (рис.4,а) и эскизы генерируемых сечений (рис.4,б)

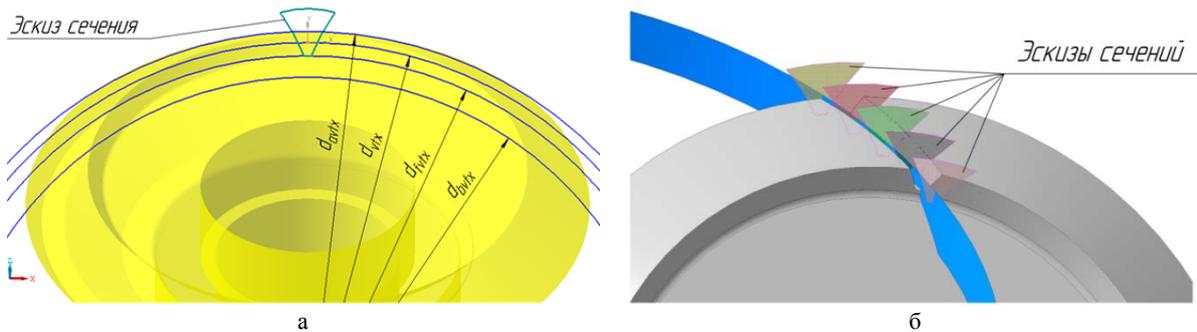


Рис. 4. Трехмерные операции построения зуба: а – построение эвольвент зуба; б – эскизы сечений

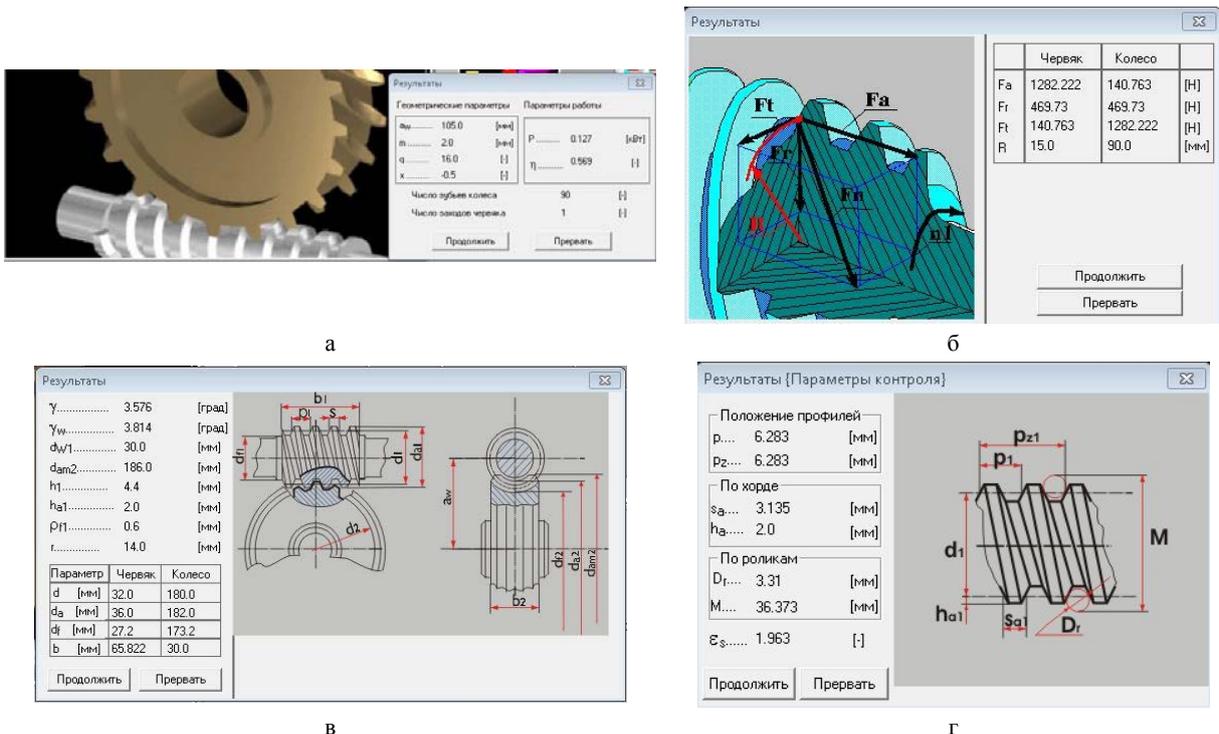


Рис. 5. Результаты расчета червячной передачи: а – основные параметры; б – силы в зацеплении; в – геометрические параметры; г – параметры контроля

Для оценки основных конструктивных характеристик червячной передачи привода поворота стола станка ОЦЗВ произведем ее расчет с помощью системы автоматизированного проектирования APM WinMachine [20, 21].

Расширенный проектировочный расчет червячной передачи (ЧП) осуществим в модуле проектирования механических передач вращения APM Trans [22, 23]. При заданной внешней нагрузки, материале червяка и колеса, типе термообработки определим основные геометрические параметры передачи, силы, действующие в ней, параметры контроля положения боковых поверхностей, а также допуски и посадки в зацеплении (рис.5).

В процессе исследования червячной передачи в APM FEM [17, 24, 25] построена конечно-элементная сетка (рис. 6, а), с числом конечных элементов 11515, и количеством узлов для стержневых элементов более, чем 3000. В системе APM FEM каждый конечный стержневой элемент включает два узла, которые имеют 6 степеней свободы. Взаимодействие конечных элементов друг с другом реализовано через их узлы, а моделирование его сводится к решению системы алгебраических уравнений. Совместным решением системы уравнений, на базе предварительно сформированной матрицы жесткости являются величины смещений (рис. 6, б) и величины напряжений (рис. 6, в). Расчет стержневых элементов ведется с учетом всех концентраторов напряжений. Это позволяет более точно определять величины действующих напряжений.

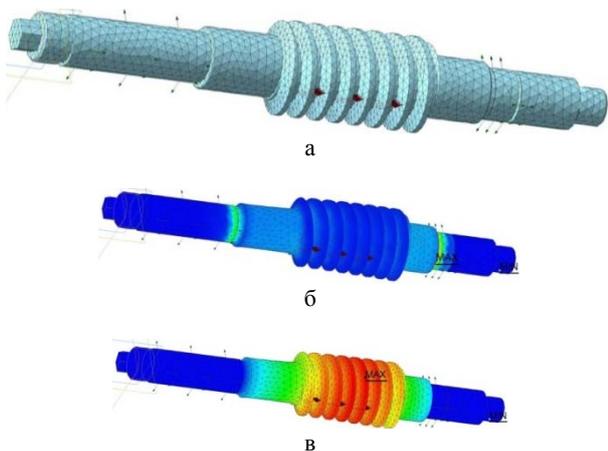


Рис. 6. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния червячной передачи: а – конечно-элементная сетка; б – поля напряжений; в – поля перемещений

Выше рассмотренные 3D-модели обрабатывающего центра и его основных узлов представлены на 15 международном конкурсе «Будущие Асы Цифрового машиностроения», Представленный проект стал серебряным призером этого конкурса.

Получены три патента на полезные модели:  
- № 95715 «Безззорна черв'ячна передача»;  
- № 99664 «Поворотний стіл металорізального верстата»

-№ 113876 «Поворотний стіл металорізального верстата.

**Выводы.** Проведено комплексное исследование конструкции червячной передачи обрабатывающего центра модели ОЦЗВ с использованием процедур 3D-моделирования в САПР КОМПАС и инженерного анализа конструкции методом конечных элементов.

Построена 3D-модель червячной передачи, дающая реальное представление о ее конструкции. При профилировании поверхностей зуба использована усовершенствованная машинная процедура с учетом того, что не сохраняется геометрическое подобие профилей. Реализована процедура анализа и расчета напряженно-деформированного состояния червячной передачи в модуле APM FEM с учетом влияния внешней загрузки и собственного веса каждого из элементов. Выполнен расчет элементов червячной передачи, представленных в виде стержней с учетом имеющихся концентраторов напряжений, который позволяет более точно оценить воздействие изменяющихся внешних нагрузок. Широкий спектр возможностей модуля APM FEM позволяет совершенствовать качество проектируемых приводов металлорежущих станков, значительно сократить вес конструкции, а следовательно и понизить его стоимость.

#### Литература

1. Детали и механизмы металлорежущих станков / Под ред. Д.Н. Решетова. Т 2. – М.: Машиностроение, 1972. – 520 с.
2. Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник, Т. 3 / Под ред. Ачеркана Н.С. – М.: Машиностроение, 1969. – 472 с.
3. Проектирование механических передач / С. А. Чернавский, Г.А. Снесарев, Б.С.Козинцов и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 560 с.
4. Бернацкий И.П., Вьюшкин Н.И., Герасимов В.К., Комков В.Н. Рациональный выбор параметров зацепления червячных цилиндрических передач // Зубчатые и червячные передачи. – Л.: Машиностроение, 1974. – С. 193-210.
5. Бернацкий И.П. Исследование червячных с вогнутым профилем витков червяка, нарезаемых резцом / И.П. Бернацкий // Известия вузов.Машиностроение. – 1962. – №10. – С.29-37.
6. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584 с.
7. Shevchenko S., Muhovaty A., Krol O. Geometric Aspects of Modifications of Tapered Roller/ Procedia Engineering150 (2016) 1107-1112.
8. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів в середовищі APMWinMachine. Підручник. ISBN 978-966-590-926-2 (Затверджено МОНМСУ як підручник, гриф №1/11-

- 4102 від 25.05.11р.). - Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. - 400 с.
9. Кріль О.С. Параметричне моделювання металорежущих станків і інструментів. Монографія. ISBN 978-966-590-935-4 / Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012. – 116 с.
  10. Кріль О. С. Методи и процедури 3D-моделювання металорежущих станків и інструментів. Монографія. ISBN 978-617-11-0049-7/ О.С. Кріль. – Северодонецьк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2015. – 120 с.
  11. Krol O. 3D-modeling of the rotary table for tool SVM1F4 with non-clearance worm gearing. Krol, S. Shevchenko, I. Sukhorutchenko, A. Lysenko [Text] // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. –Vol.14. – № 1. 2014.– Lublin, Poland. – P. 126-133.
  12. . Krol O. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/ O. Krol, V. Osipov //TEKACom. Mot. andEnerg. in Agriculture. – OLPAN, 2013, Vol.13, № 3, Lublin, Poland. – P. 108-113.
  13. Krol O. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 /O. Krol, I. Sukhorutchenko [Text] // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. –Vol.13. – № 3. 2013.– Lublin, Poland. –P. 114-119.
  14. Кріль О.С., Кузовов А.Ю., Суржиков С.Н. Исследование и 3D-моделирование поворотного стола обрабатывающего центра // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля– 2016. – №2 (226). – С. 34-39.
  15. Кріль О.С., Шевченко С.В., Сіндєєва О.В., Покінтелиця М.І. Проектування механічних передач металорізальних верстатів за допомогою системи WinMachine. Навчальний посібник, ISBN 978 – 966 – 590 – 652 – 0 / Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. – 200с.
  16. Решетов Д. Н. Детали машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
  17. Кріль О.С. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. Навчальний посібник. ISBN 978-617-11-0074-9/ О.С. Кріль, В.І. Соколов. - Северодонецьк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – 160 с.
  18. Krol O., Khmelniysky A. 3D-modelling and investigating of spinle's node of angular head for multyoperation tool/ TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Lublin, Poland. –Vol.15. – № 3. (2015), P. 35-40.
  19. Кріль О.С. 3D-моделирование шпиндельного узла угловой головки многооперационного станка/ О.С.Кріль, А.В.Хмельницкий // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля– 2015. – №5 (222). –С. 24-32.
  20. Кріль О.С. Моделирование шпиндельного узла обрабатывающего центра / О.С.Кріль, Е.И.Бурлаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ» - № 11(985), 2013. – С. 33-38.
  21. Кріль О.С. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра / О.С.Кріль, А.А.Кріль, Е.И. Бурлаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ» - № 16(989), 2013. – С. 14-18.
  22. Нерубашенко А.А., Кріль О.С., Кріль А.А. Создание базы данных параметрических моделей деталей станков в модуле АРМ Base // Вісник СевНТУ, 2010, вип.107. – С.107-109
  23. Кріль О.С., Кріль А.А., Сіндєєва Е.В. Моделирование конструкции четырехопорного вала в САПР АРМ «WinMachine» // «Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні». Зб. наук. пр. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2008. – С. 139 – 143
  24. Соколов В.І., Кріль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
  25. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. - 142 с.

#### References

1. Details and mechanisms of metal-cutting machine tools / Ed. D.N. Reshetov. Т 2. – М.: Mechanical Engineering, 1972. – 520 p.
2. Details of machines. Calculation and design. Handbook, Т. 3 / Ed. N.S. Acherkan – М.: Mechanical Engineering, 1969. – 472 p.
3. The design of mechanical transmission / S.A. Chernovsky, G.A. Snesarev, B. S. Kozintsov and others. – М.: Mechanical Engineering, 1984. – 560 p.
4. Bernatsky I.P., Vjushkin N.I., Gerasimov V.K., Komkov V.N. Rational choice of the gearing parameters of worm gears // Toothed and worm gears. – L.: Mechanical Engineering, 1974. – P. 193-210.
5. Bernatsky I.P. Investigation of worm-like with a concave profile of the wavy curls, cut by a cutter / I.P. Bernatsky // Izvestiya Vuzov.Mashinostroenie. – 1962. – №10. – P.29-37.
6. Litvin F.L. The theory of gearing. – М.: Nauka, 1968. – 584 p.
7. Shevchenko S., Muhovaty A., Krol O. Geometric Aspects of Modifications of Tapered Roller / Procedia Engineering 150 (2016) 1107-1112.
8. Krol O.S., Shevchenko S.V., Sokolov V.I. Design of metal-cutting machines in the environment of АРМ WinMachine. Textbook. ISBN 978-966-590-926-2 (approved by MONMSU as textbook, neck No. 1 / 11-4102, dated May 25, 2011 year). - Lugansk: Publishing house of SNU, 2011. – 400 p.
9. Krol O.S. Parametric modeling of metal-cutting machines and tools. Monograph. ISBN 978-966-590-935-4 / Lugansk: Publishing house of SNU, 2012. – 116 p.
10. Krol O.S. Methods and procedures of 3D-modeling of metal-cutting machine tools and instruments. Monograph. ISBN 978-617-11-0049-7 / O.S. Krol. – Severodonetsk: Publishing house of SNU, 2015. – 120 p.
11. Krol O. 3D-modeling of the rotary table for the tool SVM1F4 with non-clearance worm gearing O. Krol, S. Shevchenko, I. Sukhorutchenko, A. Lysenko [Text] // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. -Vol.14. – No. 1. 2014. – Lublin, Poland. – P. 126-133.
12. . Krol O. Modeling of construction spindle's node machining center SVM1F4 / Krol O, Osipov V. // TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. - OL PAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. – P. 108–113.
13. Krol O. 3D-modeling and optimization spindle's node machining center SVM1F4 / O. Krol, I. Sukhorutchenko [Text] // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. -Vol.13. – No. 3. 2013. – Lublin, Poland. – P. 114-119.
14. Krol O.S., Kuzovov A.Yu., Surzhikov S.N. Investigation and 3D modeling of the turning table of the processing center // Bulletin of the SNU.-2017. – №3 (22\_). – P. \_.

15. Krol O.S., Shevchenko S.V., Sindyeva O.V., Pokintelitsya M.I. Design of mechanical gears of metal-cutting machines with the help of a system APM WinMachine. Handbook, ISBN 978 - 966 - 590 - 652 - 0 / Lugansk: Publishing house of SNU, 2007. – 200 p.
16. D.N. Reshetov. Details of machines. – M.: Mechanical Engineering, 1989. – 496 p.
17. Krol O.S. Three-dimensional modeling of machine tools and tool equipment. Handbook. ISBN 978-617-11-0074-9 / O.S. Krol, V.I. Sokolov. – Severodonetsk: Publishing house of SNU, 2016. – 160 p.
18. 18 / Krol O., Khmelnskiy A. 3D-modelling and investigating of the spinle's node for the angular head for multyoperation tool / TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. – Lublin, Poland. – Vol. – No. 3. (2015), p. 35-40.
19. Krol OS 3D-modeling of the spindle node of the angular head for the multi-operation machine / O.S. Krol, A.V. Khmelnskiy // Bulletin of the SNU. – 2015. – №5 (222). – P. 24 - 32.
20. Krol O.S. Modeling of the spindle unit of the machining center / O.S.Krol, E.I.Burlakov // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies - Kharkiv: NTU "KhPI" - № 11 (985), 2013. - C. 33 - 38.
21. Krol O.S. Solid modeling and investigation of the spindle node of the machining center / O.S.Krol, A.A. Krol, E.I. Burlakov // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU " KhPI". – № 16 (989), 2013. – P. 14-18.
22. Nerubashchenko A.A., Krol O.S., Krol A.A. Creation of a database of parametric models for machine parts in the APM Base module // Bulletin of SevNTU, 2010, issue 107. – p.107-109.
23. Krol O.S., Krol A.A., Sineeveva E.V. Modeling of the design of the four-shaft shaft in the CAD APM "WinMachine" // "Resource-saving technologies of production and processing of materials in machine building". Digest of scientific works. – Lugansk: Publishing house of SNU, 2008. – p. 139-143.
24. V. Sokolov, O. Krol, O. Yepifanova. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
25. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.

**Кроль О.С., Фіронов Д.В., Великоцький В.В.**  
**Дослідження і 3D-моделювання поворотного столу**  
**обробного центра**

*У статті проведено дослідження конструкції і геометрії черв'ячної передачі. Запропоновано модифіковану процедуру комп'ютерного профілювання робочих поверхонь зуба черв'ячного колеса. Здійснено силовий і геометричний розрахунки черв'ячної передачі в модулі APM Trans. Виконано дослідження напружено-деформованого стану контактних поверхонь черв'яка методом кінцевих елементів з використанням модуля APM FEM. Побудовано 3D-моделі черв'ячної передачі, яка використовується в механізмі повороту обробного центру ОЦЗВ в інтегрованої САІР КОМПАС-3D.*

**Ключові слова:** черв'ячна передача, обробний центр, механізм повороту, 3D- модель

**Krol O., Fironov D., Velikotsky V. Research and 3D-**  
**modelling of worm gear of the feed drive for the machining**  
**center**

*The article investigates the construction and geometry of the worm gear. A modified procedure for computer profiling of the working surfaces for a tooth of a worm wheel is proposed. The power and geometric calculations of the worm gear in the APM Trans module are carried out. Investigation of the stress-strain state of the worm contact surfaces by the finite element method using the FEM APM module is performed. 3D models of the worm gear used in the rotation mechanism of the processing center OTS3V in the integrated CAD KOMPAS-3D are constructed. The control parameters, including the profile parameters for the chord and for the rollers are calculated*

**Keywords:** worm gear, machining center, swing mechanism, 3D model

**Кроль О.С.** – к.т.н., доцент, професор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, e-mail: [krolos.snu.edu@gmail.com](mailto:krolos.snu.edu@gmail.com)

**Фіронов Д.В.** – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля

**Великоцький В.В.** – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 21.09.2017