

УДК 621.9.06

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА УГЛОВОЙ ГОЛОВКИ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА

*Кроль О.С., Хмельницкий А.В.*

## INVESTIGATING TO SPINLE'S NODE OF ANGULAR HEAD FOR MULTYOPERATION TOOL

Krol O., Khelnitsky A.

*Приведено решение задачи анализа работоспособности шпиндельного узла, используемого в многооперационном станке модели СФ68ПФ4. Даны рекомендации по построению статических формуляров в символьном виде для двухопорного шпиндельного узла на радиально-упорных подшипниках качения. Рассмотрена процедура комплексного исследования шпиндельной головки станка на базе модуля проектирования валов и осей APM SHAFT. Получены оценки напряженно-деформированного состояния, позволяющие моделировать конструкцию двухопорного шпиндельного узла по критериям прочности и жесткости.*

**Ключевые слова:** *угловая головка, шпиндельный узел, твердотельная модель, САПР КОМПАС, модуль APM FEM*

**Введение.** В практике машиностроительного производства встречается целая гамма деталей, имеющих сложную геометрию с труднодоступными поверхностями. Традиционные компоновки станков сверлильно-фрезерно-

расточного типа не могут обеспечить полный цикл обработки корпусных деталей такой конфигурации. Возникает необходимость повышения технологических возможностей металлорежущего оборудования с использованием специальной технологической оснастки. Особенно актуально эта проблема стоит перед разработчиками многоцелевых станков и обрабатывающих центров. Эффективность внедрения такого оборудования зависит также от используемого комплекта модульной оснастки. Часто сменяемые инструментальные блоки и выдвигаемые требования к повышению точности изготавливаемых изделий приводит к необходимости проведения исследований по критериям прочности и жесткости шпиндельных узлов.

В работе по исследованию жесткости формообразующих узлов рассматриваются конструкции обрабатывающих центров среднего типоразмера [1], предлагается процедура «зондирования» показателей податливости шпинделя с инструментом в рамках рабочей зоны обработки с учетом типоразмера станка. В работе [2] рассматривается процедура комплексного исследования упругой системы «патрон-деталь» в токарных прутковых автоматах [2]. Приводится модель, на основе которой оценивается работоспособность конструкции оснастки токарных автоматов по критериям жесткости и виброустойчивости.

В работе [1] приводится численная оценка изменения жесткости с привязкой к координатам детали и координатам инструмента и оценивается ее связь с принятой компоновкой для данного типоразмера. Такая оценка получена для конкретного варианта оснастки главного привода и не отражает влияние типа оснастки на изменения базисной жесткости, что характерно для многооперационных станков.

На параметры жесткости станка значительное влияние оказывает компоненты системы «оснастка-инструмент» или «оснастка-деталь». Исследование такой упругой системы как «патрон-деталь» осуществляется на базе расчетной модели зажимного патрона в виде «балка с заделкой»,

рассматриваемая как упруго-фрикционный шарнир, позволяющий добиться большего приближения по точности в расчете деформационных характеристик станка. Вместе с тем, по сравнению с токарными прутковыми автоматами в многоцелевых станках значительно шире представлены типы применяемой оснастки, а следовательно и разнообразие технологических операций.

В связи с повсеместным распространением автоматизированного металлообрабатывающего оборудования, появляется необходимость решения задачи – определение и исследование характеристик жесткости для многооперационного станка при выполнении специфических технологических операций.

**Целью данной работы** является повышение эффективности процесса проектирования за счет построения твердотельных моделей шпиндельных узлов, использования системы комплексного инженерного анализа для определения упруго-деформационных характеристик шпинделей многооперационных станков, оснащенных модульной оснасткой.

**Изложение основного материала.** Для реализации технологического процесса обработки труднодоступных поверхностей корпусной детали используется угловая головка, которая зачастую входит в комплект поставки проектируемого оборудования, позволяет расширить технологические возможности сверлильно-фрезерно-расточных станков. Угловая головка предназначена для обработки в труднодоступных участках заготовок плоскостей, уступов и пазов. Она обеспечивает высокопроизводительную обработку при частотах вращения шпинделя до  $4000 \text{ мин}^{-1}$  с возможностью угла поворота шпинделя на  $360^{\circ}$  в горизонтальной плоскости. Кинематическая схема привода главного движения представлена на рис. 1.

Вращательное движение от вертикального шпинделя на шпиндель головки угловой передается через коническую пару  $\frac{42}{42}$ . Уравнение кинематической цепи углового шпинделя представлено ниже:

$$n_{\text{шп.угл.гол.}} = n_{\text{эл.дв.}} \times L_{p.n.} \times L_{к.с.} \times L_{\text{пост.п.}} \times L_{\text{пост.п.}}$$

На рис. 2 представлен фрагмент кинематической схемы угловой головки.

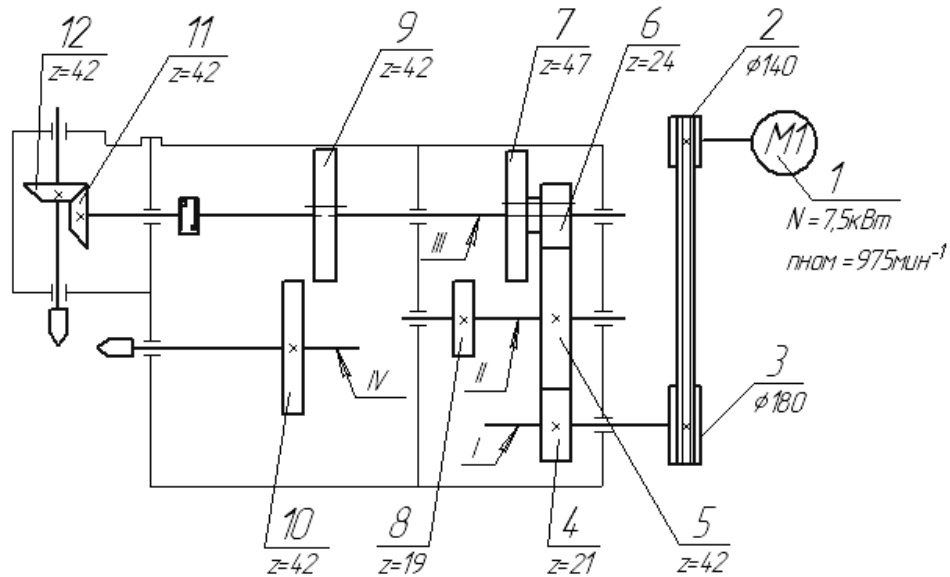


Рис. 1. Кинематическая схема привода главного движения

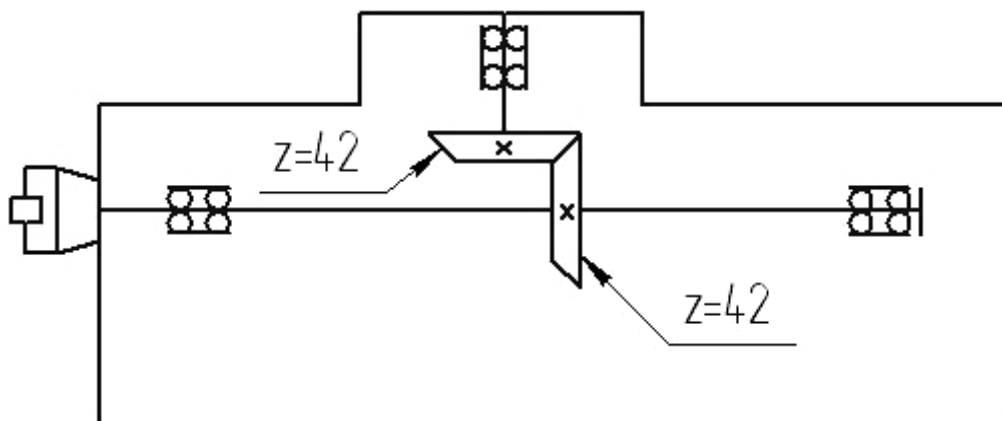


Рис.2. Кинематическая схема угловой головки

Исследования жесткости шпиндельного узла (ШУ) осуществляется с помощью разработанной упругодеформационной модели [3] в виде аналитических зависимостей выходных характеристик ШУ от основных характеристик шпинделя (межопорное расстояние, диаметр под переднюю

опору) и опор (схема монтажа, тип подшипника, предварительный натяг). Целесообразно выделить две основные компоненты:

- унифицированный шпиндельный узел, который может быть смонтирован в разнообразных многооперационных станках;

- инструментальный блок (инструмент) как изменяемый компонент, настраиваемый на различную номенклатуру изготавливаемых изделий и представленный в виде модульной инструментальной оснастки.

В различных сверлильно-фрезерно-расточных многооперационных станках применяются унифицированные шпиндельные узлы, которые оснащаются системами вспомогательных инструментов, в том числе с конусом Морзе и с конусностью 7:24 размерностью 30, 40, 45, 50 и 60 мм. В наборы оснастки входят оправки закрепляемой в шпинделе станка, переходные втулки и патроны для непосредственного крепления инструмента.

Среди характеристик ШУ, оказывающих наибольшее влияние на работоспособность его конструкции необходимо выделить длину межопорной части  $\ell$ , длину консольной части  $\ell_1$ , и диаметр  $d$ ).

Первый компонент (унифицированный ШУ) представлен в упругодеформационной модели в виде статического формуляра  $sf$  [4], т.е. в виде аналитической зависимости перемещения опор  $\Delta_2$  и собственно шпинделя  $\Delta_3$  от длины консоли  $\ell_k$ . Для того, чтобы разработать формуляр следует построить систему из четырех линейных уравнений с граничными условиями [3]. В качестве примера рассмотрим специализированный вертикальный фрезерно-сверлильный станок с ЧПУ модели СФ68ПФ4. В математической системе MAPLE разработана программа (рис. 3) и с ее помощью получены в символьной форме величины реакций и моментов на задней и передней опорах  $\{R_z, R_p, m_z, m_p\}$ :

$$R_z = -0,04 + 0,0029 \ell_k; R_p = 0,96 + 0,0029 \ell_k; m_z = -24,44 - 0,064 \ell_k; m_p = 91,18 + 0,74 \ell_k.$$

```

Text Math Drawing Plot Animation
C Maple Input Monospaced 12 B I U
> A:=matrix(4,4,[-1,1,0,0,1+l1,-l1,1,1,Az-l^3/(6*E*Ips),-Ap,-az*l-1^2/(2*E*Ips),0,1^2/(2*E*Ips),0,-az-l/(E*
Ips),-ap]);
table([(1,1)=0.2370370370e-6,(1,4)=0,(2,2)=-62,(3,1)=0.1150617285e-5,(2,1)=174,(1,1)=-1,(2,3)=1,(4,2)=0,(4,3)=
-0.5632804233e-8,(2,4)=1,(1,3)=0,(1,2)=1,(3,3)=-0.3938370370e-6,(3,4)=0,(3,2)=-0.10e-4,(4,4)=-0.14e-8]) (1)
> B:=vector(4,[R1,R1*l1,0,0]);
table([(1)=1,(2)=lk,(3)=0,(4)=0]) (2)
> X:=linsolve(A,B);
table([(1)='+`(-0.4228688568e-1,`*(0.2863297827e-2,`*(lk)),(2)='+(.9577131143,`*(0.2863297827e-2,`*(lk)),(3)='+`(-24.44104099,
`*(-0.6433731701e-1,`*(lk))),(4)='+(91.17717219,`*(.7436479604,`*(lk))]) (3)
> Rz:=X[1];
-0.04228688568 + 0.002863297827 lk (4)
> Rp:=X[2];
0.9577131143 + 0.002863297827 lk (5)
> Rz+Rp;
0.9154262286 + 0.005726595654 lk (6)
> mz:=X[3];
-24.44104099 - 0.06433731701 lk (7)
> mp:=X[4];
91.17717219 + 0.7436479604 lk (8)
> Rz*(1+l1)-Rp*l1+mz+mp;
0.9999999997 lk (9)
> sf:=(Az-((1+l1)^2/(6*E*Ips))*(1+l1+3*lk))*Rz-(l1^2/(6*E*Ips))*(l1+3*lk)*Rp+(az*(1+l1+lk)+((1+l1)/(2*E*Ips))*
(1+l1+2*lk))*mz+(l1/(2*E*Ips))*(l1+2*lk)*mp;
(-0.00002318231292 - 5.721088435 10^-7 lk) (-0.04228688568 + 0.002863297827 lk) - 2.421264802 10^-8 (62 + 3 lk) (0.9577131143 + 0.002863297827 lk) (10)
+ (8.157088435 10^-7 + 7.975963720 10^-9 lk) (-24.44104099 - 0.06433731701 lk) + 1.171579743 10^-9 (62 + 2 lk) (91.17717219 + 0.7436479604 lk)
> simplify(sf);
-0.00001377124690 - 9.581147375 10^-8 lk - 6.167684094 10^-10 lk^2 (11)
> y(1+l1):=Az*Rz+az*mz*(1+l1)+mz*(1+l1)^2/(2*E*Ips)-Rz*(1+l1)^3/(6*E*Ips)+mp*l1^2/(2*E*Ips)-Rp*l1^3/(6*E*Ips);

```

Рис. 3. Фрагмент программы определения статического формуляра

Вычисленные значения реакций позволяют определить прогиб  $y(x)$  и угол поворота  $y'(x)$  на правом конце шпинделя ( $x=l+l_1$ ) в функции от длины  $l_k$  условной консоли:

$$y = y(l+l_1) = -0,000014 - 6,91 \cdot 10^{-8} \cdot l_k, \text{ мм};$$

$$y' = \theta(l+l_1) = -2,67 \cdot 10^{-8} - 6,17 \cdot 10^{-10} \cdot l_k, \text{ град.}$$

На основе разработанной программы в среде MAPLE [4] получен статический формуляр шпиндельного узла, как средство его исследования в условиях применения различной инструментальной оснастки:

$$Sf = -0,000014 - 9,58 \cdot 10^{-8} \cdot l_k - 6,17 \cdot 10^{-10} \cdot l_k^2.$$

На рис. 4 представлены графики изменения перемещений, углов поворота и собственно статический формуляр шпиндельного узла станка СФ68ПФ3, построенные на основе разработанной автором программы в среде MatLab [5].

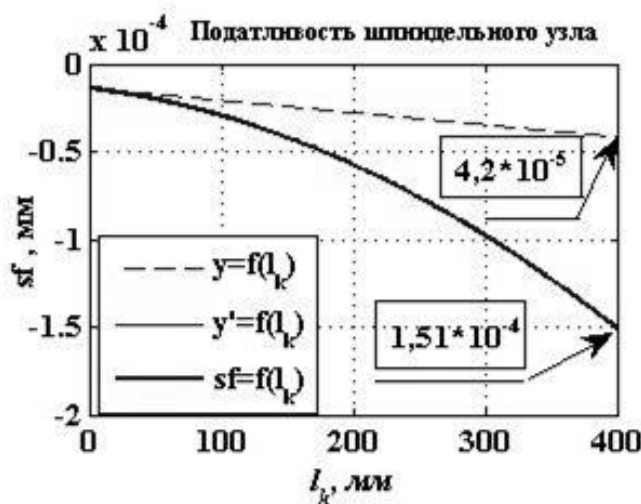


Рис. 4. Кривые податливости шпиндельного узла

Сравнение с допустимыми перемещениями и углами поворота сечений ШУ позволяет судить о работоспособности шпиндельного узла по критерию жесткости.

Аналогичные результаты получены в модуле проектирования валов и осей APM Shaft [6], который позволяет выполнить весь цикл проектирования валов, начиная от разработки конструкции и заканчивая статическим и динамическим расчетом. В специализированном графическом редакторе данного модуля в распоряжении конструктора предоставляются гибкие и удобные средства: задания конструкции вала; ввод нагрузок, действующих на вал; размещения опор, на которых установлен вал. Основным отличием графического редактора APM Shaft состоит в специализированном наборе графических примитивов, с которыми он оперирует. В качестве расчетного метода для определения деформированного состояния вала используется метод Мора, а раскрытие статической неопределенности выполняется методом сил.

Эпюры распределения сил и моментов и основные характеристики напряженно-деформированного состояния шпиндельного узла станка СФ68ПФ4, полученное в модуле APM Shaft представлено на рис. 5.

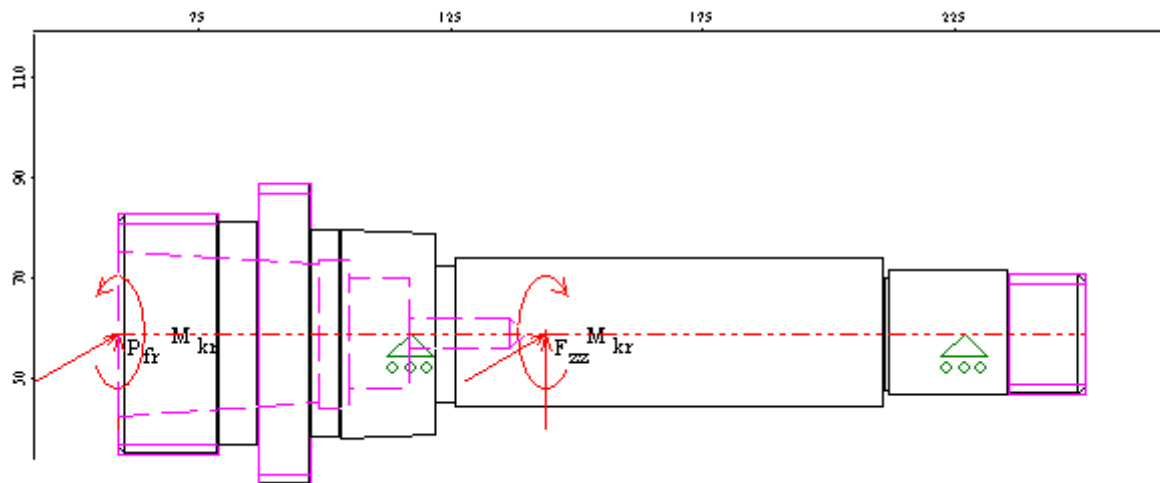


Таблица: Нагрузки

Радиальные силы

N	Расстояние от левого конца вала, мм	Модуль, Н	Угол, град
0	0.00	1182.42	39.68
1	85.00	4200.11	75.54

Моменты кручения

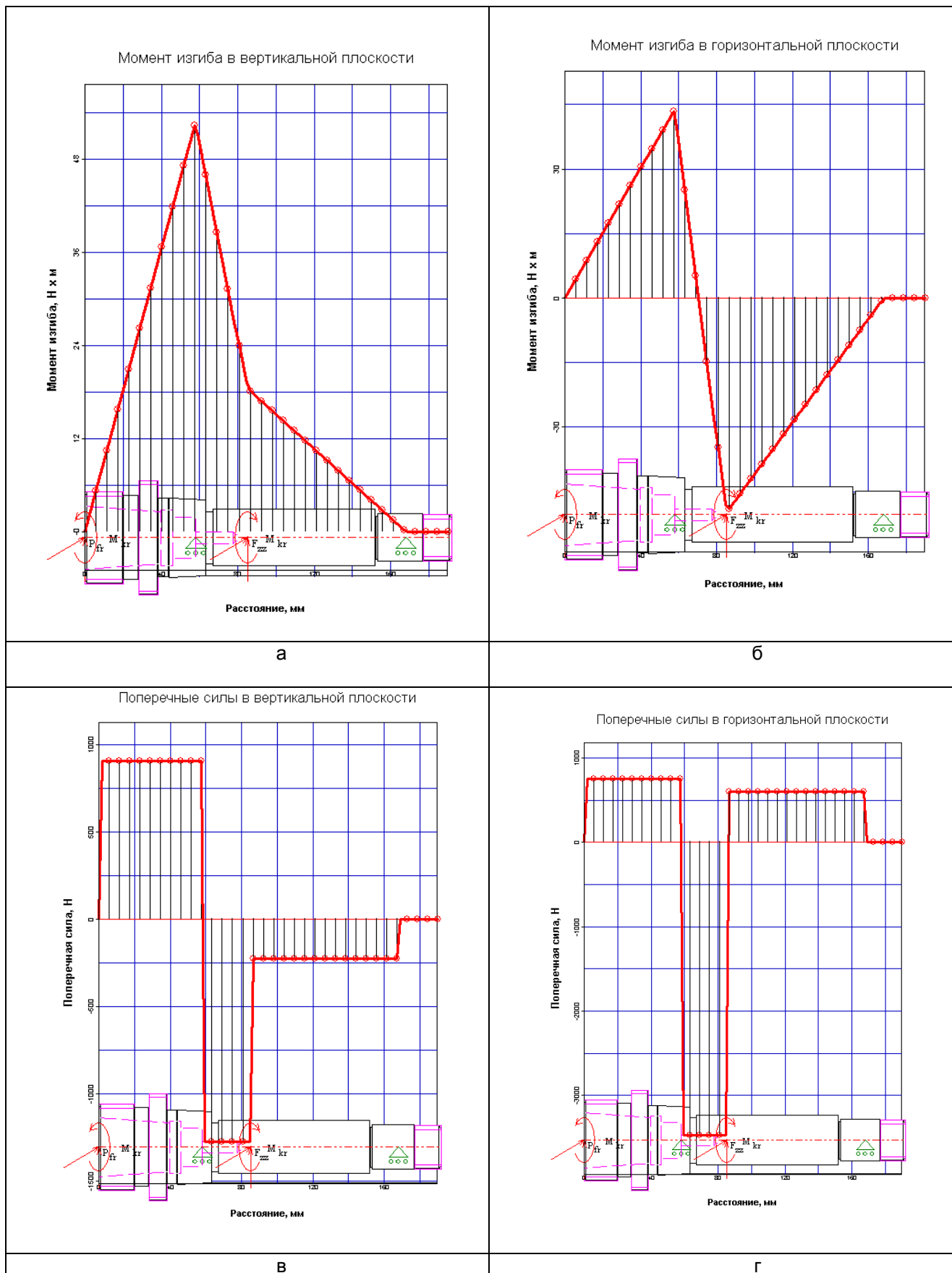
N	Расстояние от левого конца вала, мм	Значение, Н·м
0	0.00	32.00
1	85.00	-32.00

Реакции в опорах

N	Расстояние от левого конца вала, мм	Реакция верт., Н	Реакция гориз., Н	Реакция осевая, Н	Модуль, Н	Угол, град
0	58.00	-2181.34	-4221.83	0.00	4752.06	-152.68
1	168.00	222.34	600.17	0.00	640.03	159.67

Рис. 5. Результаты расчетов шпинделя по критериям прочности и жесткости





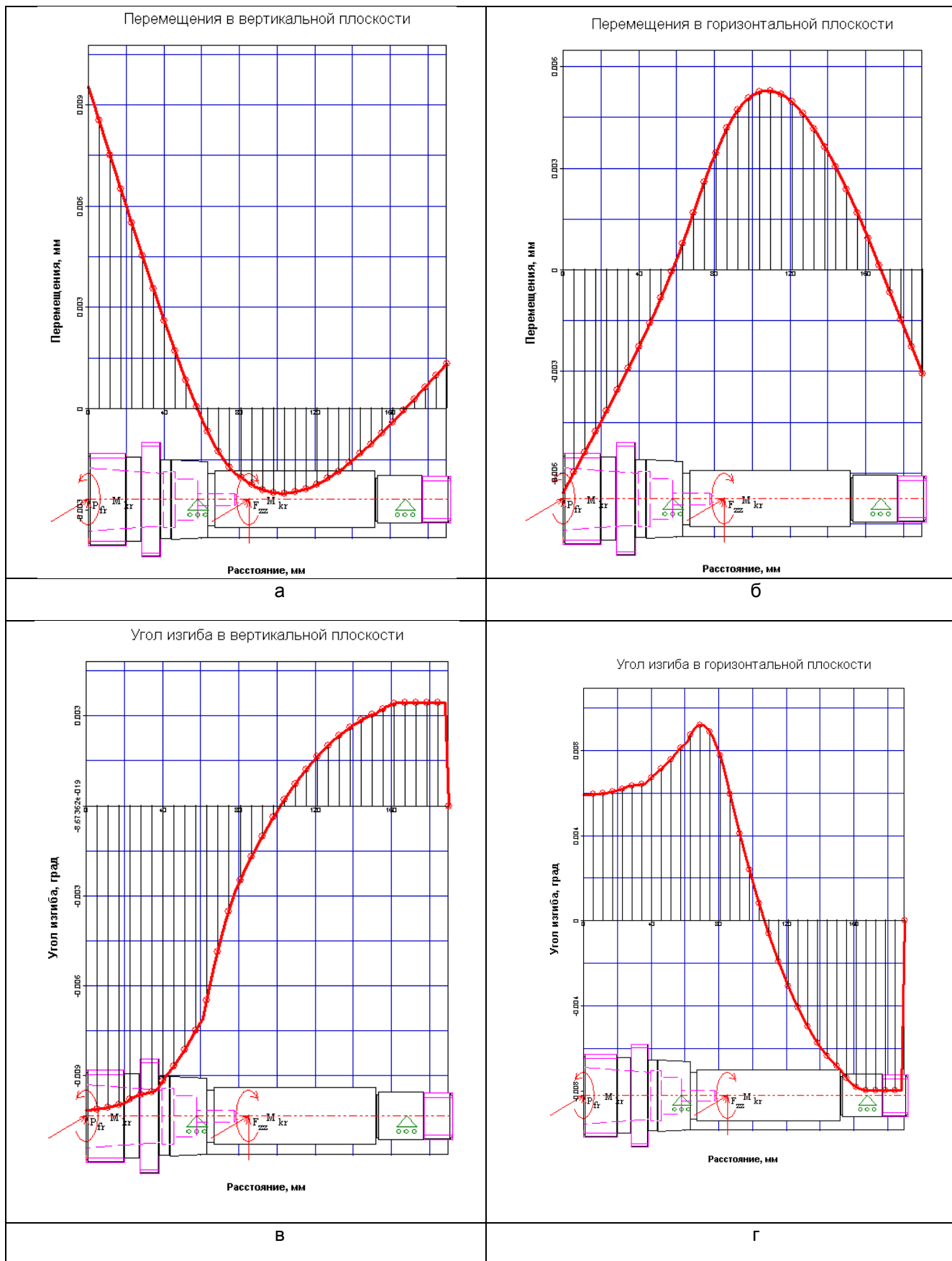


Рис. 7. Перемещения и углы изгиба сечений шпинделя

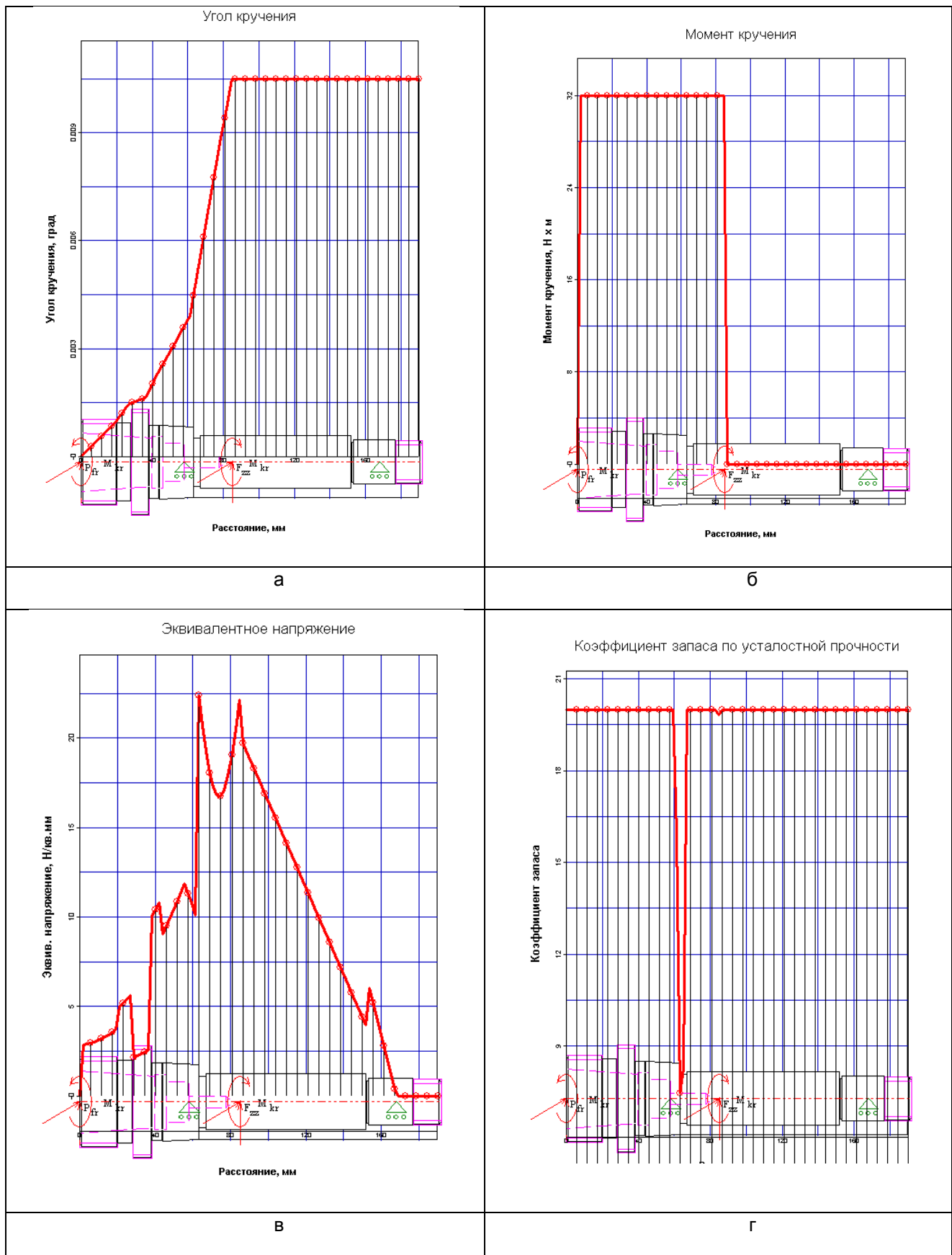


Рис. 8. Характеристики напряженного состояния шпинделя

**Выводы.** 1. Построена статическая модель унифицированного шпиндельного узла станка СФ68ПФ3, учитывающая общие свойства двухопорных конструкций на радиально-упорных подшипниках качения. С помощью такой модели рассчитываются статические формуляры в символьном виде для станков представителей сверлильно-фрезерно-расточной группы. Это значительно сокращает трудоемкость расчетных работ и открывает перспективы масштабных исследований в области моделирования и совершенствования современных конструкций шпиндельных узлов.

2. Выполнено комплексное исследование конструкции шпиндельного узла специализированного горизонтального фрезерно-сверлильного станка второго типоразмера модели СФ68ПФ3 с использованием модуля АРМ SHAFT и получены результаты расчета по критериям прочности и жесткости.

## Л и т е р а т у р а

1. Угринов П. Жесткость обрабатывающих центров среднего типоразмера / Угринов П. // Автоматизация и управление в машиностроении. - № 5. - 2001. – С.43-47.

2. Кузнецов Ю.Н. Новое в теории и практике проектирование зажимных механизмов / Кузнецов Ю.Н.// Вестник Киевского национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». «Машиностроение».- 1998.- выпуск 33.- С. 85-106.

3. Попов В.И. Динамика станков / Попов В.И., Локтев В.И. - Киев: "Техника".- 1975.-136 с.

4. Дьяконов В.П. Математическая система Maple / Дьяконов В.П. – М.: СОЛОН. – 1998. – 400 с.

5. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс/ Лазарев Ю. – СПб: ПИТЕР. – 2005. – 512 с.

6. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин. Примеры решения задач / Шелофаст В.В., Чугунова Т.Б. – М.: Изд-во АПМ. - 2004. – 240 с.

7. Ганин Н.Б. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D / Ганин Н.Б. – М.: ДМК. – 2012. – 774 с.

8. Krol O. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 / Krol O., Zhyravlev V. // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol.13. - № 4. – Lublin, Poland. - P. 134 – 142.

### References

1. Ugrinov P. Zhestkost obrabativayuschikh tsentrov srednego tiporazmera / Ugrinov P. // Avtomatizatsiya i upravlenie v machinostroenii . - № 5. - 2001. – S.43-47.

2. Kuznetsov Yu.N. Novoe v teorii i praktike proektirovaniya zazhimmikh mekhanizmov / Kuznetsov Yu.N. // Vestnik Kievskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy “Kievskii politekhnicheskyy institute”. “Mashinostroenie” ». - 1998. - vipusk 33. - S. 85-106.

3. Popov V.I. Dinamika stankov / Popov V.I., Loktev V.I. – Kiev: Tekhnika. – 1975. – 136 s.

4. Dyakonov V.P. Matematicheskaya sistema MAPLE / Dyakonov V.P. – M.: SOLON. – 1998. – 400s.

5. Lazarev Yu. Modelirovanie protsessov i system v MATLAB. Uchebnyi kurs / Lazarev Yu. – SPb.: PITER. – 2005. – 512 s.

6. Shelofast V.V. Osnovy proektirovaniya mashin. Primery resheniya zadach / Shelofast V.V., Chugunova T.B. – M.: izd-vo APM. – 2004/ - 240 s.

7. Ganin N.B. Trekhmernoe proektirovanie v KOMPAS-3D / Ganin N.B. – M.: ДМК. – 2012. – 774 с.

8. Krol O. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 / Krol O., Zhyravlev V. // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol.13. - № 4. – Lublin, Poland. - P. 134 – 142.

**Кроль О.С., Хмельницький А.В. Дослідження шпиндельного вузла кутової головки багатоопераційного верстата**

*Наведено рішення задачі аналізу працездатності шпиндельного вузла, використовуваного в багатоопераційному верстаті моделі СФ68ПФ4. Дано рекомендації з побудови статичних формулярів в символному вигляді для двухопорного шпиндельного вузла на радіально-упорних підшипниках кочення. Розглянуто процедуру комплексного дослідження шпиндельної головки верстата на базі модуля проектування валів і осей АРМ SHAFT. Отримано оцінки напружено-деформованого стану, що дозволяють моделювати конструкцію двухопорного шпиндельного вузла за критеріями міцності і жорсткості.*

*Ключові слова: кутова головка, шпиндельний вузол, твердотільна модель, САПР КОМПАС, модуль АРМ FEM*

**Krol O.S., Khelnitsky A.V. Investigating to spinle's node of angle-head for machining centre**

*The solution of problems to analysis of efficiency for spindle assembly used in multistage milling-boring SF68PF4 model type are describe. The analysis of the design angle head machine designed for processing in remote parts of pieces of planes, ledges and grooves is represented. A variant of the corner construction of the spindle head which provides high processing speeds with spindle to  $4000 \text{ min}^{-1}$  with the possibility of rotation angle of the spindle  $360^{\circ}$  in a horizontal plane. Recommendations are given for the construction of static forms in symbolic form for the doubly-spindle unit in the angular contact ball bearings. It is proposed to allocate two components form a static associated with unified formative assembly and replacement tooling. A procedure for a comprehensive study of the spindle head of the machine based on module design shafts and axes ARM SHAFT. Estimations of*

*the stress-strain state, allowing to simulate a double-seat structure spindle assembly according to the criteria of strength and stiffness.*

**Keywords:** angle-head, spinle's node, solid model, CAD KOMPAS, module of APM FEM

**Кроль Олег Семенович** – кандидат технических наук, профессор кафедры машиностроения, станков и инструментов Восточноукраинского национального университета им. Владимира Даля. [krolos@yandex.ru](mailto:krolos@yandex.ru)

**Кроль Олег Семенович** – кандидат технічних наук, професор кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. [krolos@yandex.ru](mailto:krolos@yandex.ru)

**Krol Oleg Semenovich** - is a Candidate of Technics, Professor of Machinebuilding, Tools and Instrument Department Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. [krolos@yandex.ru](mailto:krolos@yandex.ru)

**Хмельницький Андрей Валерьевич** – студент кафедры машиностроения, станков и инструментов Восточноукраинского национального университета им. Владимира Даля.

**Хмельницький Андрій Валерійович** – студент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.

**Khelnitsky A.V.** - is a student of Machinebuilding, Tools and Instrument Department Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.

Статья подана 18.09.15