

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.S., Khmelniisky A.V.

*Приведено решение задачи анализа работоспособности шпиндельного узла, используемого в многооперационном станке модели СФ68ПФ4. 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 АРМ 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:

$$n_{\text{шп.угл.гол.}} = n_{\text{эл.дв.}} \times L_{p.n.} \times L_{k.c.} \times L_{\text{ност.л.}} \times L_{\text{ност.л.}}$$

На рис. 2 представлен фрагмент кинематической схемы угловой головки.

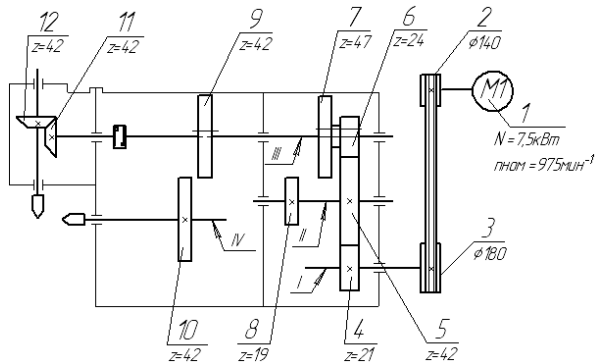


Рис. 1. Кинематическая схема привода главного движения

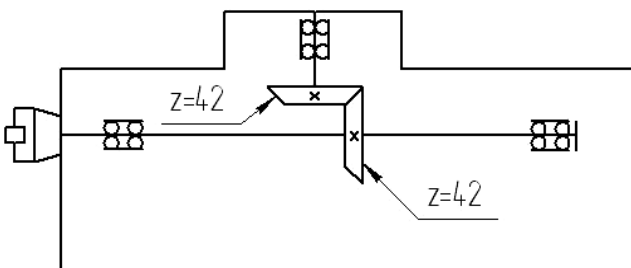


Рис. 2. Кинематическая схема угловой головки

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  $l$ , длину консольной части  $l_1$ , 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  $l_k$ .

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  $\{R_z, R_p, m_z, m_p\}$ :

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

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:

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

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

```

Text Math Drawing Plot Animation
C Maple Input Monospaced 12 B I U
> A:=matrix(4,4,[-1,1,0,0,1+11,-11,1,1,Az-1^3/(6*E*Ips),-Ap,-az*1-1^2/(2*E*Ips),0,1^2/(2*E*Ips),0,-az-1/(E*Ips),-apl];
table([[4,1)=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*lk,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)=-(9.577131143*(0.2863297827e-2*(lk))),(3)=-24.44104099-(0.6433731701e-1*(lk)),(4)=91.17717219+(7.436479604*(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+11)-Rp*11+mz+mp;
0.9999999997 lk (9)
> sf:=(Az-((1+11)^2/(6*E*Ips))*(1+11+3*lk))*Rz-((1+11)^2/(6*E*Ips))*(1+11+3*lk)*Rp+(az*(1+11+lk)+(1+11)/(2*E*Ips))*(1+11+2*lk)*mz+(11/(2*E*Ips))*(1+11+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+11):=Az*Rz+az*mz*(1+11)+mz*(1+11)^2/(2*E*Ips)-Rz*(1+11)^3/(6*E*Ips)+mp*11^2/(2*E*Ips)-Rp*11^3/(6*E*Ips);

```

Рис. 3. Фрагмент программы определения статического формуляра

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

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

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].

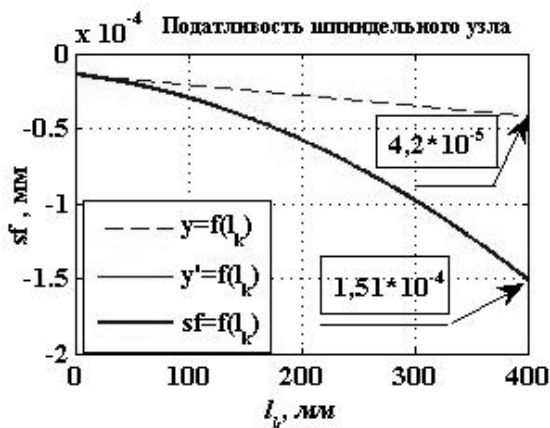


Рис. 4. Кривые податливости шпиндельного узла

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.

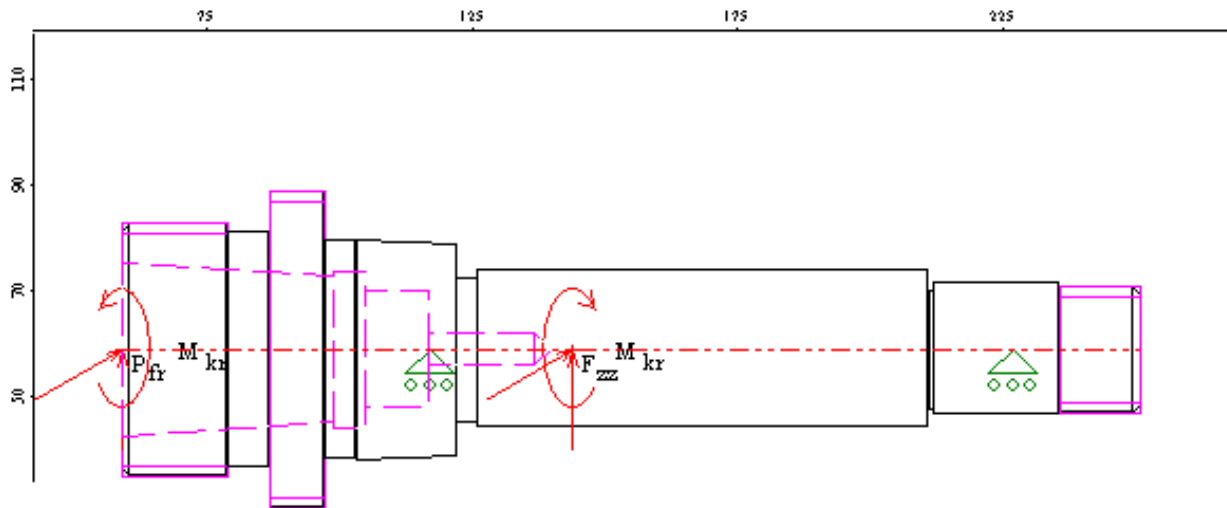


Рис. 5. Результаты расчетов шпинделя по критериям прочности и жесткости

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

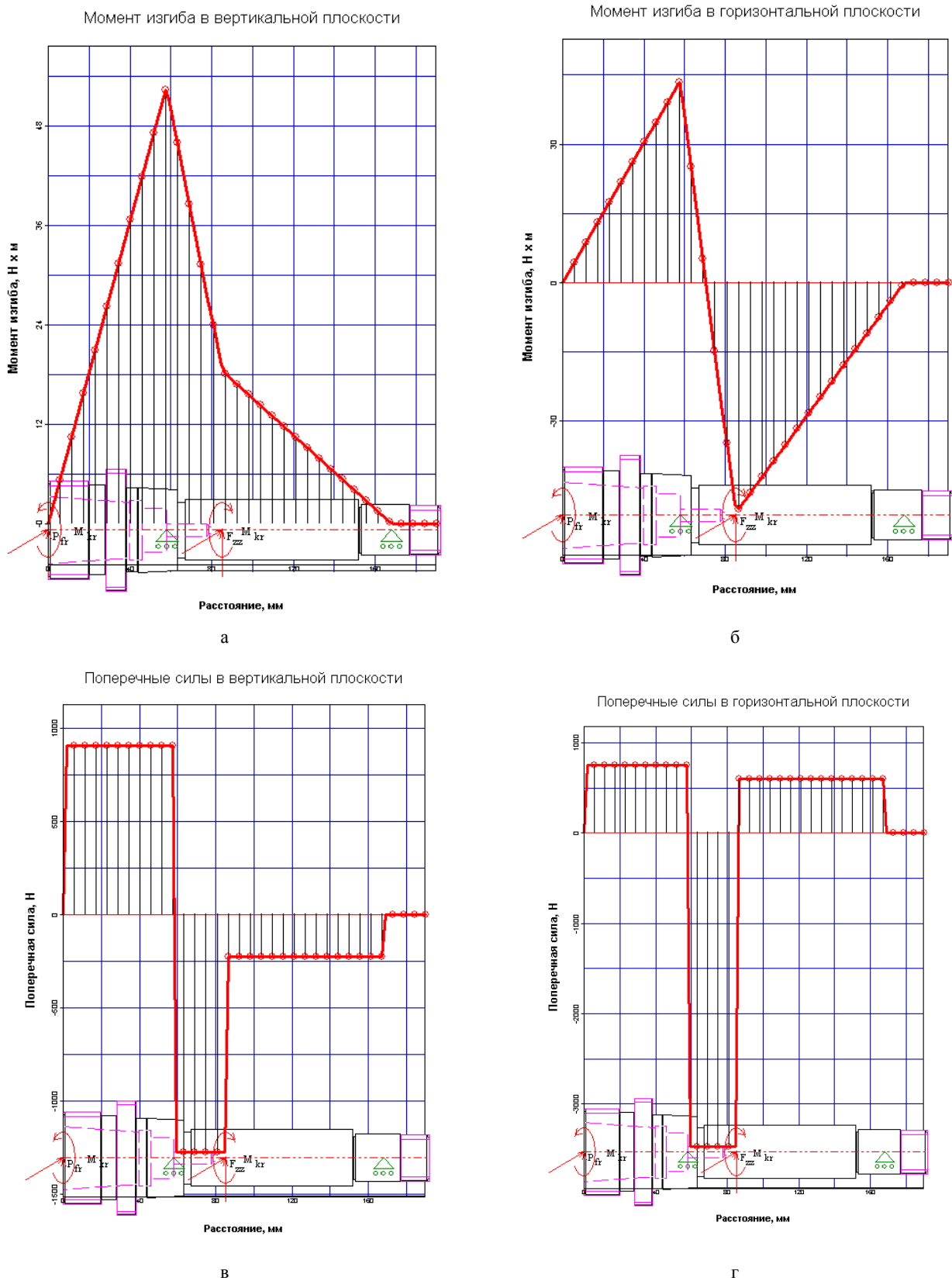


Рис. 6. Изгибающие моменты и силы, действующие на шпиндель

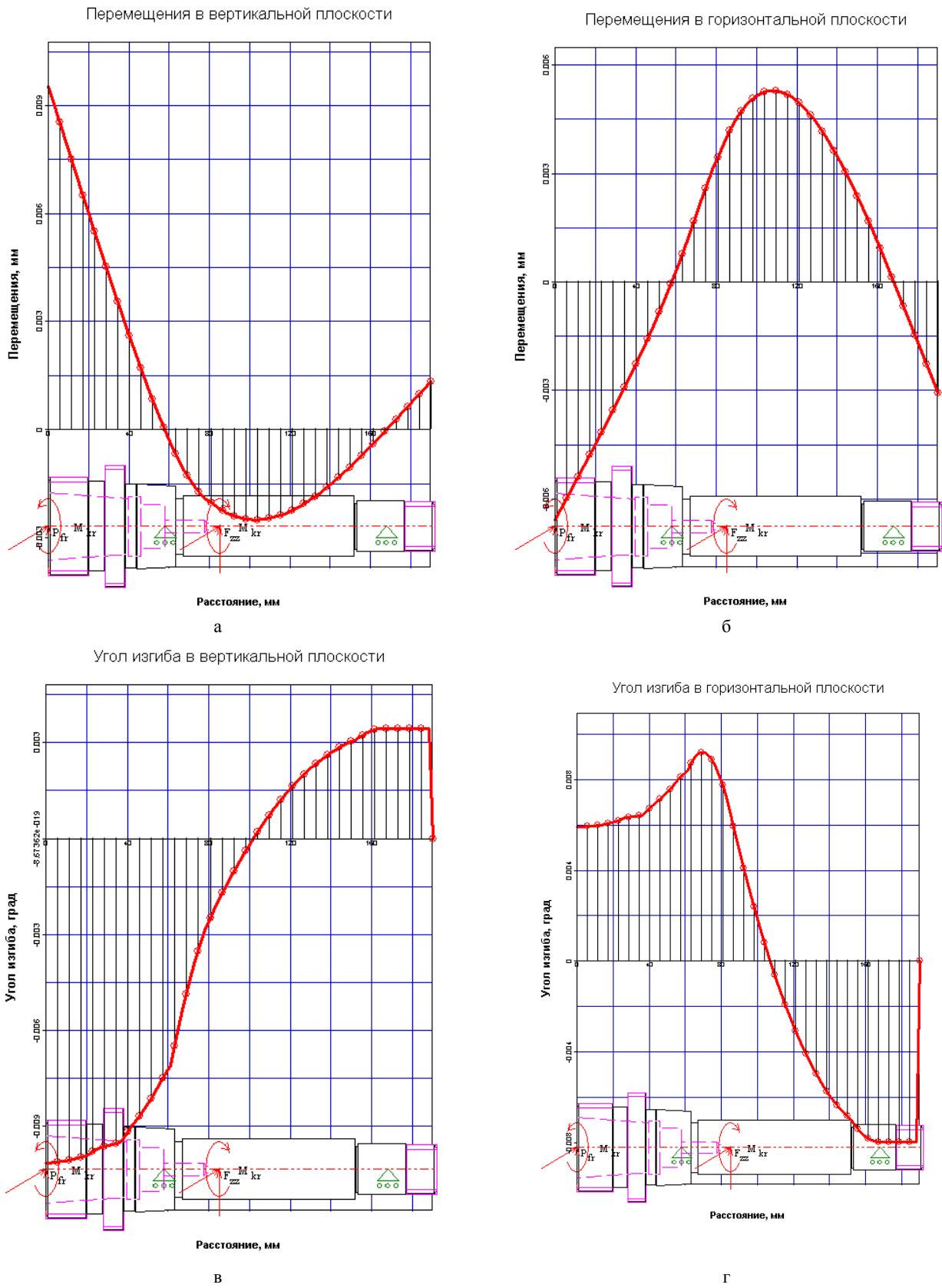


Рис. 7. Перемещения и углы изгиба сечений шпинделя

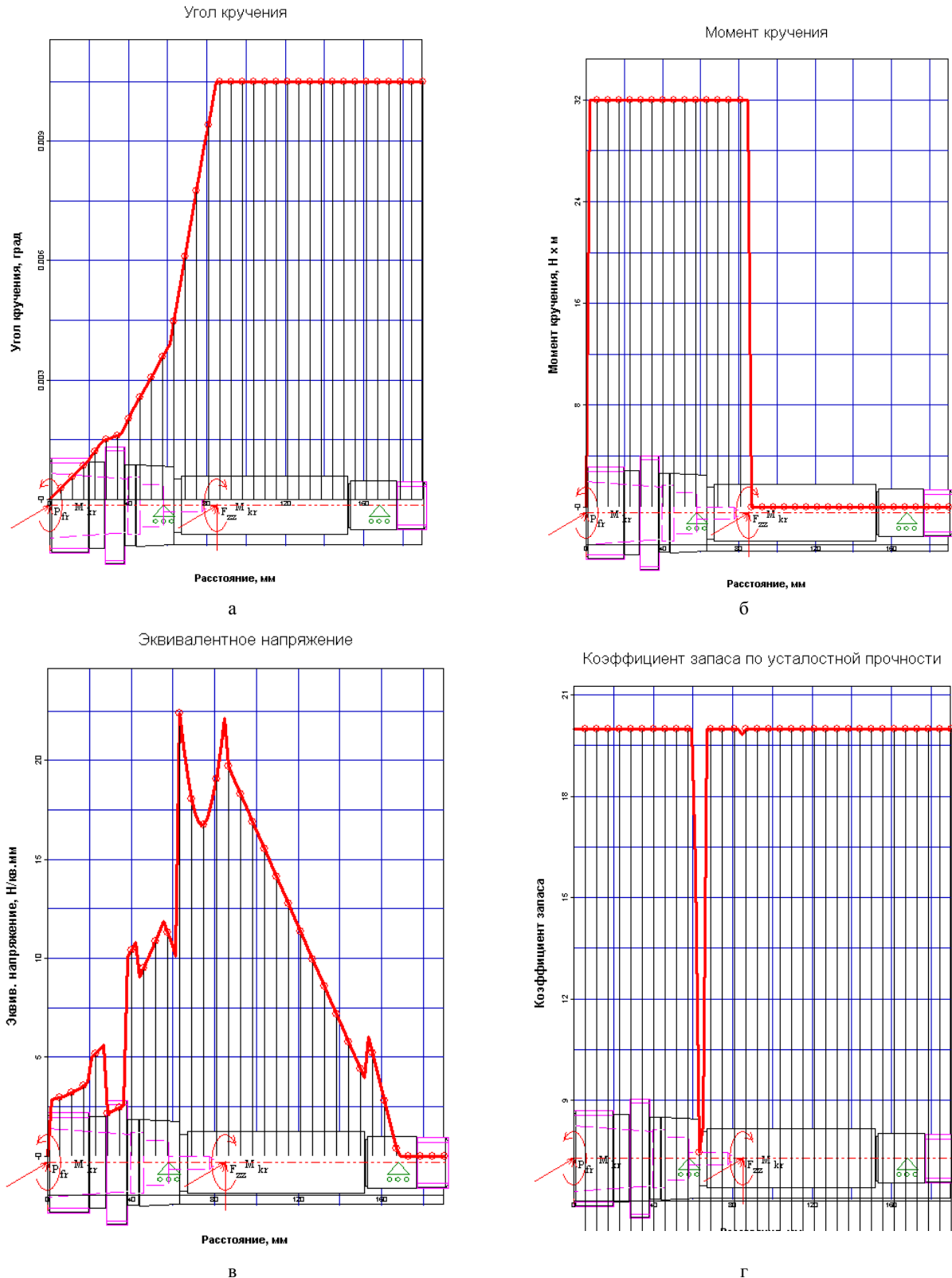


Рис. 8. Характеристики напряженного состояния шпинделя

**Выводы.** 1. Построена статическая модель унифицированного шпиндельного узла станка СФ68ПФЗ, учитывающая общие свойства двухопорных конструкций на радиально-упорных подшипниках качения. С помощью такой модели

рассчитываются статические формулы в символьном виде для станков представителей сверлильно-фрезерно-расточной группы. Это значительно сокращает трудоемкость расчетных работ и открывает перспективы масштабных

исследований в області моделювання і совершенствования современных конструкций шпиндельных узлов.

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

### Л и т е р а т у р а

1. Угринов П. Жесткость обрабатываемых центров среднего типоразмера / Угринов П. // Автоматизация и управление в машиностроении. - № 5. - 2001. - С.43-47.
2. Кузнецов Ю.Н. Новое в теории и практике проектирования 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. // ТЕКА Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. -Vol.13. - № 4.- Lublin, Poland. - P. 134 – 142.

### R e f e r e n c e s

1. Ugrinov P. Zhestkost' obrabatyvajushhijh centrov srednego tiporazmera / Ugrinov P. // Avtomatizacija i upravlenie v mashinostroenii. - № 5. - 2001. - S.43-47.
2. Kuznecov Ju.N. Novoe v teorii i praktike proektirovanie zazhimnyh mehanizmov / Kuznecov Ju.N. // Vestnik Kievskogo nacional'nogo tehničeskogo universiteta Ukrainy «Kievskij politehničeskij institut». «Mashinostroenie». - 1998. - vypusk 33. - P. 85-106.
3. Popov V.I. Dinamika stankov / Popov V.I., Loktev V.I. - Kiev: "Tehnika". - 1975. -136 s.
4. D'jakonov V.P. Matematičeskaja sistema Maple / D'jakonov V.P. - M.: SOLON. - 1998. - 400 s.
5. Lazarev Ju. Modelirovanie processov i sistem v MATLAB. Uchebnyj kurs/ Lazarev Ju. - SPb: PITER. - 2005. - 512 s.
6. Shelofast V.V. Osnovy proektirovanija mashin. Primery reshenija zadach / Shelofast V.V., Chugunova T.B. - M.: Izd-vo APM. - 2004. - 240 s.

7. Ganin N.B. Trehmernoje proektirovanie v KOMPAS-3D / Ganin N.B. - M.: DМК. - 2012. - 774 s.

8. Krol O. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 / Krol O., Zhyravlev V. // ТЕКА 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, використаного в багатоопераційному верстаті моделі СФ68ПФ4. Дано рекомендації з побудови статичних формулярів в символічному вигляді для двухопного шпиндельного вузла на радіально-упорних підшипниках кочення. Розглянуто процедуру комплексного дослідження шпиндельної головки верстата на базі модуля проектування валів і осей APM SHAFT. Отримано оцінки напружено-деформованого стану, що дозволяють моделювати конструкцію двухопного шпиндельного вузла за критеріями міцності і жорсткості.

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

### Krol O.S., Khmelnsky 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 APM 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 технічних наук, професор кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [krolas@yandex.ru](mailto:krolas@yandex.ru)  
Хмельницький Андрій Валерійович – студент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Рецензент: Соколов В.І., д.т.н., професор

Стаття подана 18.09.2015.