

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 мин^{-1} с возможностью угла поворота шпинделя на 360° 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.

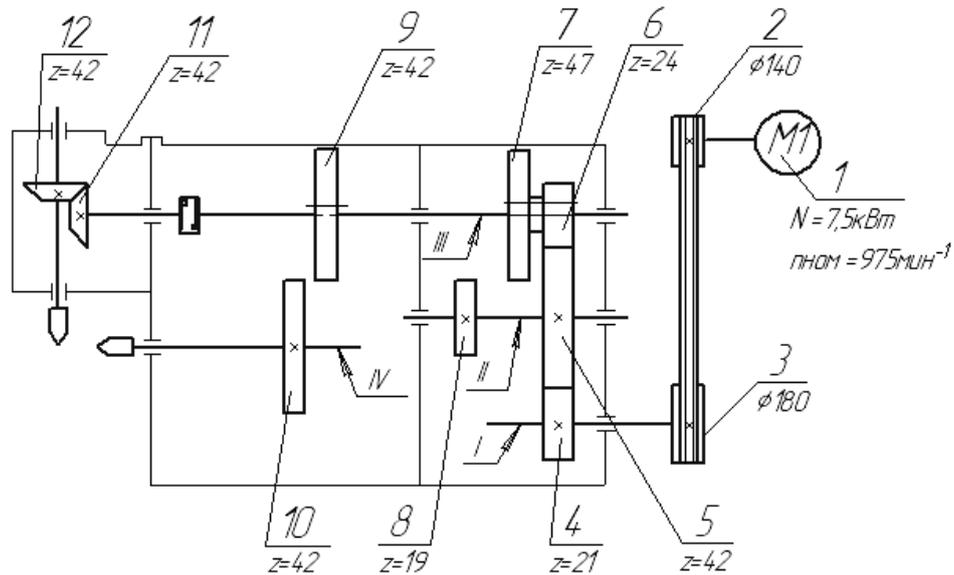


Рис. 1. Кинематическая схема привода главного движения

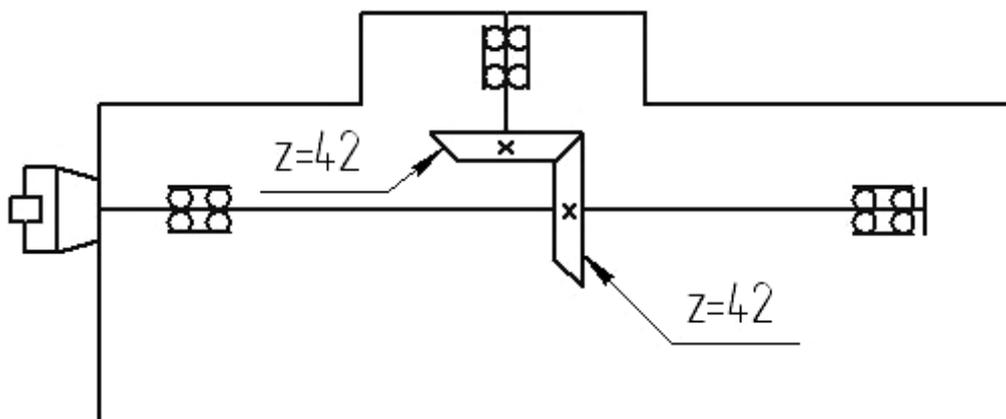


Рис.2. Кинематическая схема угловой головки

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 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 Δ_2 и собственно шпинделя Δ_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 $\{R_z, R_p, m_z, m_p\}$:

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

```

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].

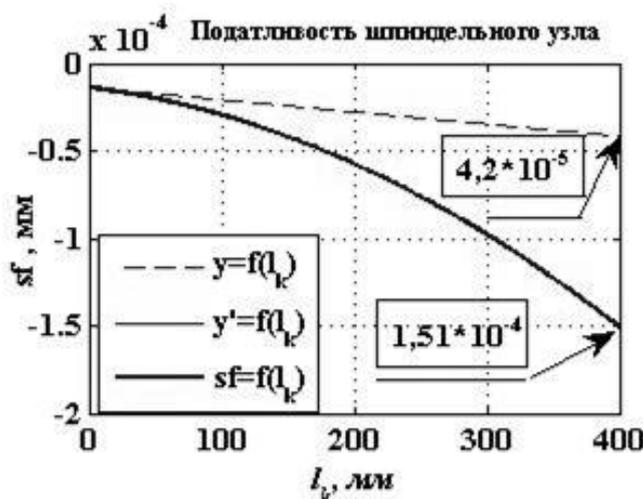


Рис. 4. Кривые податливости шпиндельного узла

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.

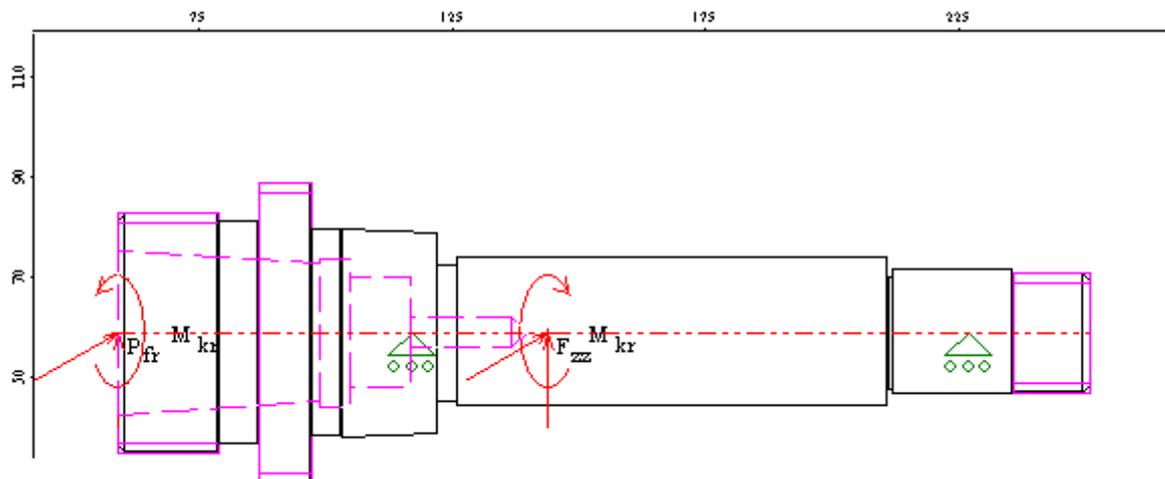


Таблица: Нагрузки

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

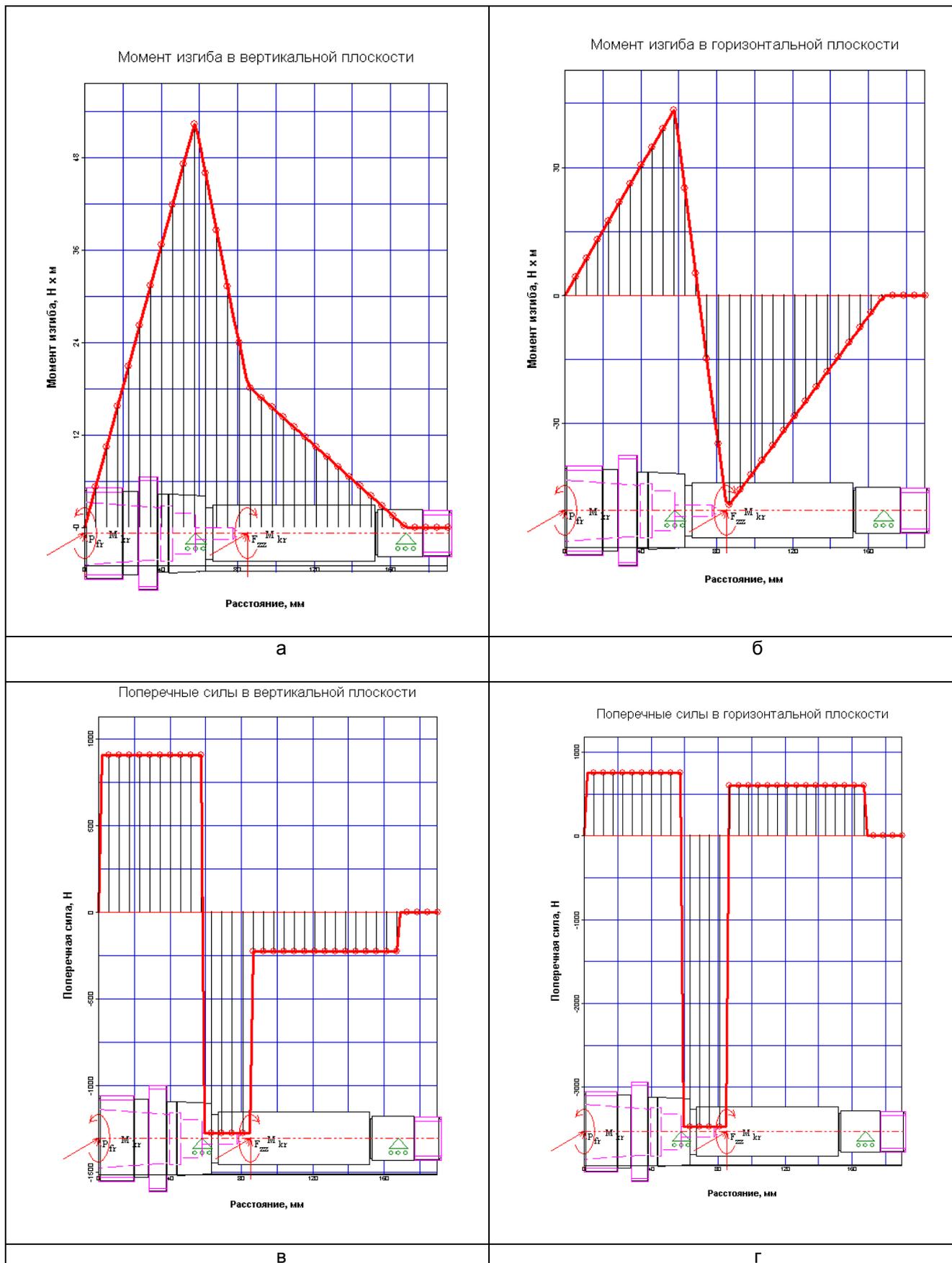


Рис. 6. Изгибающие моменты и силы, действующие на шпиндель

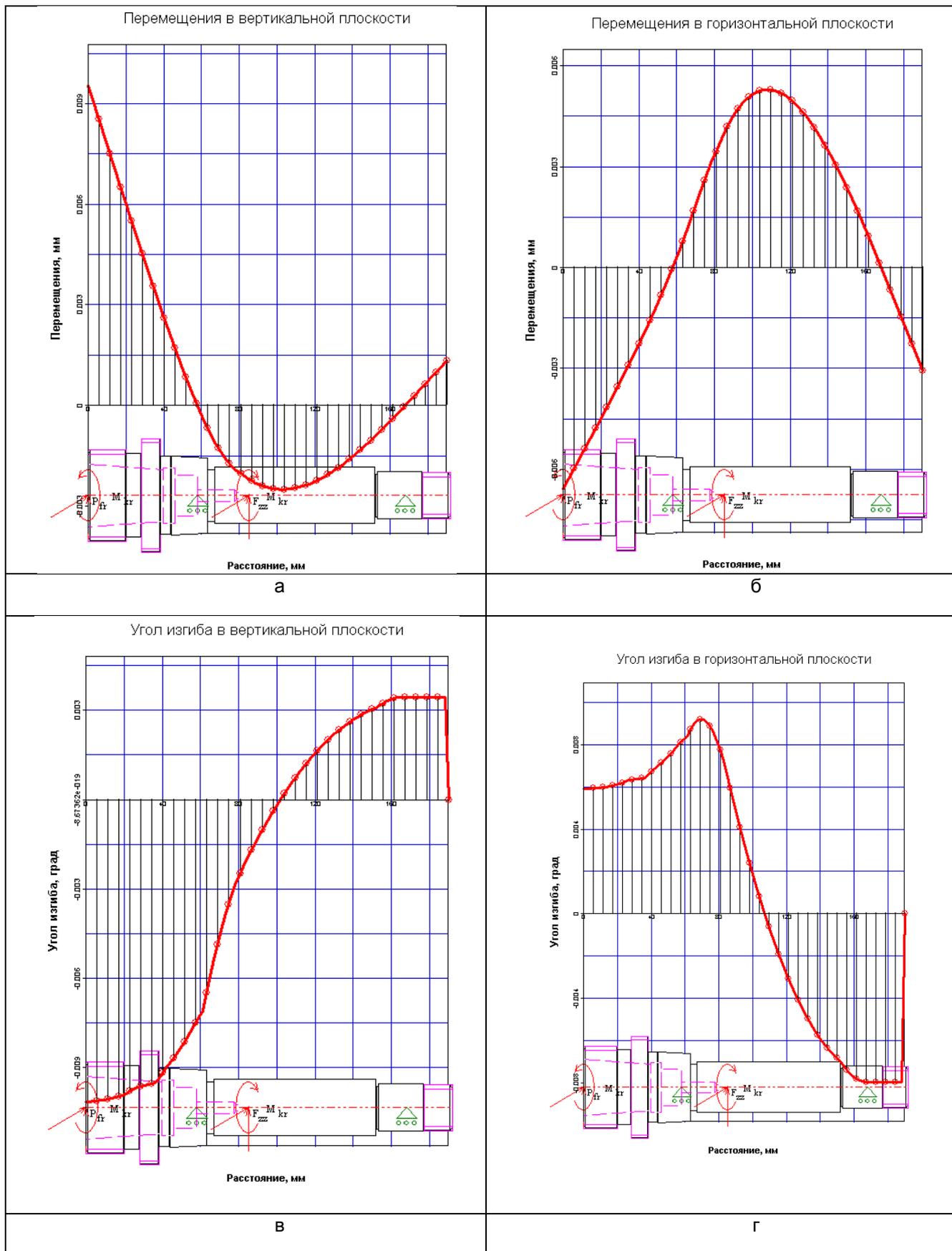


Рис. 7. Перемещения и углы изгиба сечений шпинделя

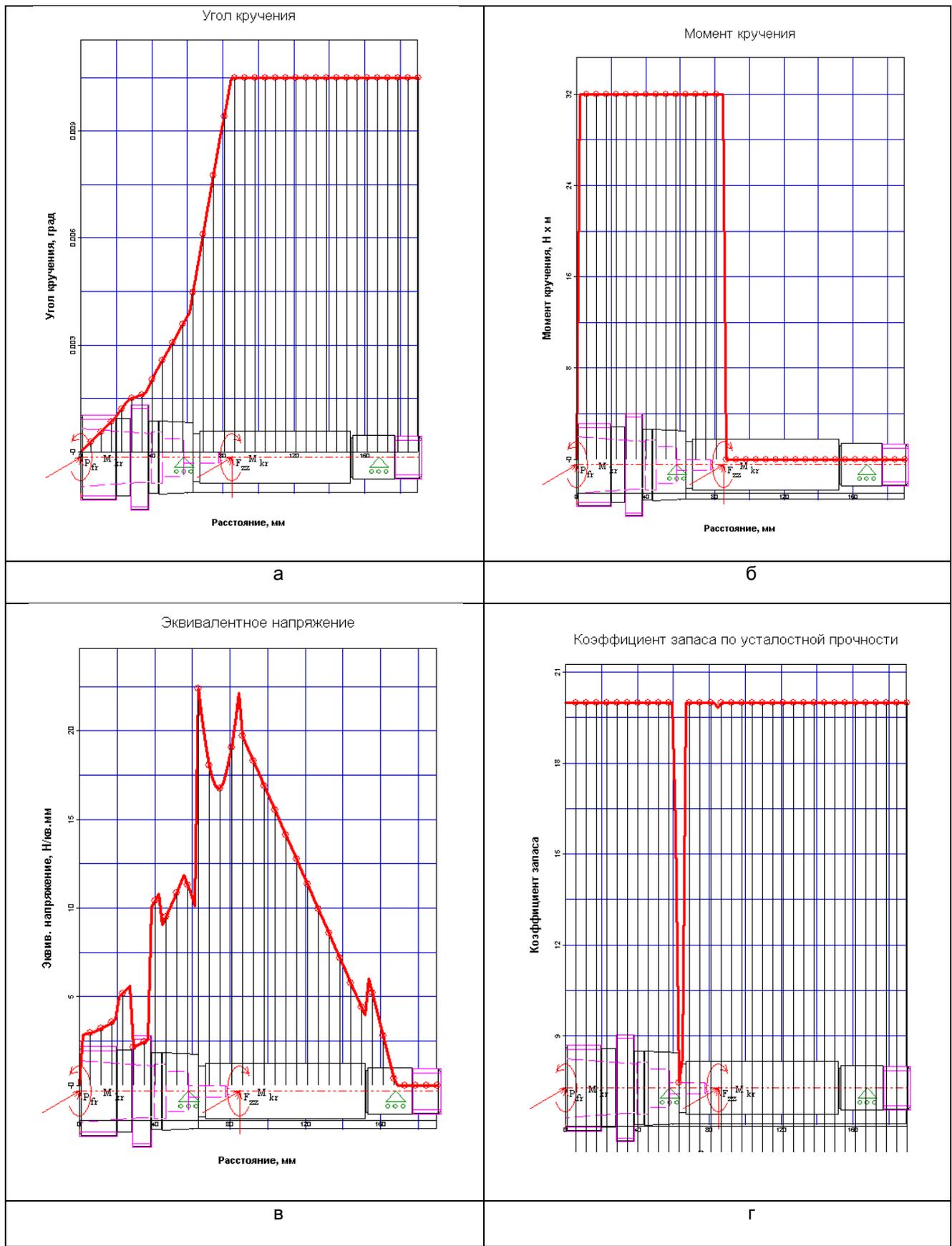


Рис. 8. Характеристики напряженного состояния шпинделя

Выводы. 1. Построена статическая модель унифицированного шпиндельного узла станка СФ68ПФ3, 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 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 min^{-1} with the possibility of rotation angle of the spindle 360° 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

Кроль Олег Семенович – кандидат технічних наук, професор кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. 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

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