

УДК 621.881

Эль-Дахаби¹ Ф. В. к.т.н., Кузнецов² Ю. Н. д.т.н., проф., Хазим³ М. Т. к.т.н.

1 – Национальная консерватория прикладного искусства, г. Бейрут, Ливан 2 – НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; 3 – Ливанский университет, инженерный факультет, г. Триполи, Ливан

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЗАЖИМНЫХ ПАТРОНОВ

El – Dahaby¹ F., Kuznetsov² Yu., Hazym³ M.

1 – National Conservatory of Arts and Crafts, Beirut, Lebanon; 2 – NTU of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; 3 – Lebanese University, Faculty of Engineering, Tripoli, Lebanon

DESIGN PRINCIPLES OF HIGH-SPEED CHUCKS

Зажимные патроны выполняют одну из важных ролей в процессе высокоскоростной обработки на станках с ЧПУ. И зачастую возникает проблема действия центробежных сил на радиальную силу зажима. Проанализировав зависимость «центробежные силы – сила зажима» при точении, а также разные способы компенсации центробежных сил, был разработан алгоритм оптимального проектирования высокоскоростных зажимных патронов. Предложено новые рычажно-кулачковые зажимные патроны и некоторые конструктивные способы увеличения жесткости стыков кулачок-направляющие.

Ключевые слова: высокоскоростной зажимный патрон, морфологический анализ, центробежные силы, радиальная сила зажима.

Введение

Современные режущие инструменты, оснащенные пластинами из твердых сплавов и сверхтвердых материалов, а также алмазные инструменты допускают высокую скорость резания. Поэтому для увеличения производительности обработки современные токарные станки с ЧПУ должны обеспечивать высокие частоты вращения шпинделя (до 15000-20000 об/мин), где одним из сдерживающих факторов являются зажимные патроны (ЗП).

Постановка задачи

При вращении заготовки или инструмента на неуравновешенные элементы ЗП действует центробежная сила $F_{wk} = mw^2 R_k$, которая приводит к уменьшению радиальной силы зажима на величину $\Delta T_w = T - T_w$ (рис. 1).

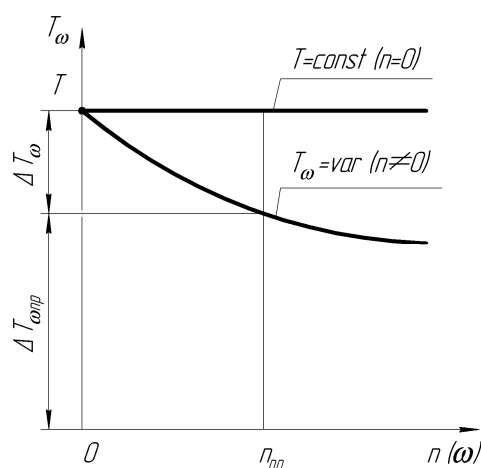


Рис. 1. График изменения радиальной силы зажима с учетом центробежных сил

падения выходной силовой характеристики.

При определенной частоте вращения ЗП полностью теряет работоспособность, когда $T_{sw} = 0$, а

Поэтому одной из силовых характеристик ЗП, работающих на высоких частотах вращения, является предельная сила зажима T_{wnp} при максимально допустимой частоте вращения $n_{np}(w_{np})$, которая по условиям эксплуатации с точки зрения техники безопасности должна быть не менее $2/3T$. Для сравнения разных конструкций ЗП в условиях высокоскоростной обработки предложено ввести дополнительный показатель – коэффициент потери радиальной силы зажима T одним зажимным элементом при одинаковой частоте вращения шпиндельного узла (или суммарной силы зажима $T_s = zT$ всеми зажимными элементами):

$$K_{T_o} = \frac{T_o}{T} = \frac{T_{\Sigma\omega}}{T_{\Sigma}} = \frac{T - \Delta T_o}{T} = 1 - \frac{\Delta T_o}{T} = 1 - \lambda_{T_o} \quad (1)$$

где $\lambda_{T_o} = \Delta T_o / T = T_{\Sigma\omega} / T_{\Sigma}$ – показатель уровня

коэффициент потери становится тоже равным нулю ($K_{T_w}=0$), что соответствует показателю уровня падения $\lambda_{T_w}=1$.

При закреплении жестких, сплошных заготовок в зависимости от степени их деформации можно отказаться от уравнивания центробежных сил, увеличив начальную силу зажима, определенную приводом (рис. 2). Однако при рабочей частоте вращения сила зажима будет меньше, чем в ЗП с компенсацией центробежных сил. Поэтому в качестве универсального ЗП для станков с ЧПУ находят применение ЗП с компенсацией центробежных сил.

Для компенсации центробежных сил, возникающих в высокоскоростных зажимных патронах (ВСЗП) при точении, возможны два способа: компенсация большими силами затяжки в ЗП и компенсация уравниванием центробежных сил. Первый способ осуществим лишь при закреплении жестких сплошных заготовок и неприемлем для закрепления податливых кольцевых заготовок. Второй способ предусматривает снабжение ЗП механизмом компенсации центробежных сил. При удачном подборе встроенных в ЗП масс и рычагов можно полностью компенсировать падение усилия зажима и надежно закреплять даже тонкостенные кольцевые детали.

Проанализируем рис. 2 с точки зрения влияния различных факторов на изменение радиальной силы зажима T от частоты вращения и возможность компенсации её потери.

Если в ЗП закрепляется тонкостенная заготовка, то оптимальная начальная сила зажима определяется допустимой деформацией заготовки и допустимой погрешностью её формы после обработки. В этом случае принимается сила $T_1=T_{\min}$, тогда работа ЗП без компенсатора при условии падения радиальной силы до $2/3 T_{\min}$ (из-за $F_{ок}$) согласно ТУ для наружного диаметра D_{\max} ограничивается частотой $n_{1\max}$ (т. A_1). Повышения производительности обработки при сохранении требований по точности необходимо применить ВСЗП с компенсацией центробежных сил, тогда для D_{\max} частота вращения повышается до $n_{1\max}^k$ (т. B_1), т.е. создаётся резерв Δn_1 для повышения быстроходности токарного станка. В этом случае нет ограничения по прочности корпуса патрона.

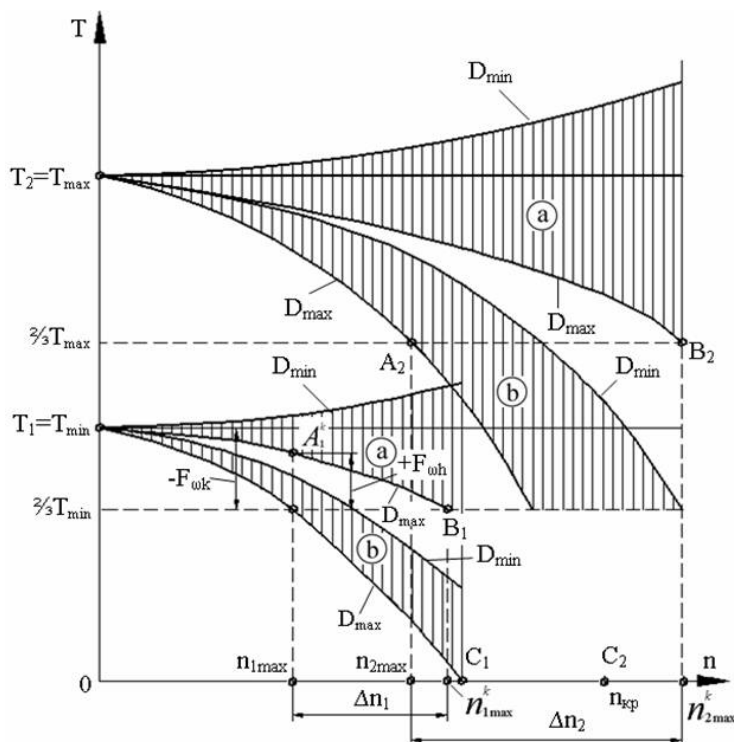


Рис. 2. Влияние центробежных сил при измерении частоты вращения и первоначальной силы зажима (а – с компенсатором; б – без компенсатора) деталей минимального D_{\min} и максимального D_{\max} диаметров

Если в ЗП закрепляются жёсткие (сплошные) заготовки максимального диаметра D_{\max} , требующие черновой обработки на высоких режимах резания, то при отсутствии компенсации центробежных сил можно увеличивать начальную радиальную силу зажима до $T_2=T_{\max}$. В этом случае допускаемая частота вращения увеличивалась до $n_{2\max}$ (т. A_2), а при введении компенсатора – до $n_{2\max}^k$ (т. B_2). Возникает ещё больший резерв Δn_2 для повышения быстроходности токарного станка. Ограничением может оказаться прочность корпуса или других слабых звеньев ВСЗП, определяемая критической частотой $n_{кр}$ (т. C_2).

Заштрихованные зоны а и б показывают различные возможности ЗП в зависимости от начальной силы

зажима с компенсацией и без компенсации центробежных сил.

Для обеспечения безаварийной надежной работы ВСЗП необходимо для каждой конструкции патрона и заготовок (сплошных и тонкостенных) по аналогии с рис. 2 составлять специальные диаграммы зажимных усилий в зависимости от частоты вращения шпинделя. По этим диаграммам находится усилие зажима T_{Σ} в зависимости от приводной силы S_{Σ} , диаметра зажима и числа оборотов с учётом положения и формы сменных кулачков.

При постановке задачи оптимального проектирования ВСЗП (рис. 3) исходными данными являются: а) тип и система управления станком; б) габариты, присоединительные размеры и опоры шпиндельного узла; в) сведения о заготовке и технические условия на готовую деталь; г) предельные частоты вращения шпинделя, схема и режимы обработки; д) габариты и конструкции традиционных зажимных патронов и приводов зажима, применяемых на аналогичных станках; е) способ передачи вращения на шпиндель от электродвигателя; ж) нормы точности, жёсткости, виброустойчивости и балансировки шпиндельного узла с ЗП.

В соответствии с работами [1, 7] проектирование целесообразно вести сверху вниз: от принципа зажима до конструкции ЗП на уровнях, для которых при анализе и выборе лучших решений формируются основные требования и показатели качества, составляются физические, динамические и математические модели [2, 3, 4, 9]. При конкретизации задачи проектирования выделяются доминирующие требования с учётом схемы, режимов обработки, точности и шероховатости обработанной поверхности детали.

Выбор принципа зажима (I уровень) и схемы ВСЗП (II уровень) следует выполнять согласно рекомендации в работах [1, 9], а для выбора схем уравнивания центробежных сил (III уровень) целесообразно воспользоваться системно-морфологическим подходом [1, 8].

Определение параметров ВСЗП целесообразно проводить после формирования предварительных исходных данных с тем, чтобы окончательно сформулировать уточнённые данные для проектирования. С этой целью уточняют ограничения, определяющие выбор схемы патрона и привода зажима: а) технологические; б) конструктивные; в) эксплуатационные.

Выбор конструкции ВСЗП и расчёт его оптимальных параметров является завершающей стадией оптимального проектирования с анализом его работы в процессе зажима-разжима и при резании. При проектировании ВСЗП оптимизация должна быть поэтапной:

1) из условия обеспечения требуемого технологического процесса определяется оптимальная сила закрепления детали в патроне (статическая и динамическая);

2) из условия минимального расхода энергии и высокого К.П.Д. выбирается тип привода зажима, тип передаточно – усилительного механизма и рассчитывается входная сила от привода зажима;

3) исходя из размеров рабочего пространства станка, присоединительных размеров шпинделя со стороны переднего торца, минимальной металлоемкости, высокой прочности и долговечности, заданного быстродействия оптимизируются геометрические параметры ВСЗП.

Процесс проектирования ВСЗП целесообразно разделить на 2 этапа:

1) выбор схем патронов и способов компенсации центробежных сил с использованием системно-морфологического подхода; 2) разработка конструкции патрона и его основных элементов.

Когда схемы ВСЗП выбраны, их подвергают всестороннему анализу, критике и сравнительной оценке по различным показателям или по комплексному показателю [1, 8]. Анализ предложенных вариантов позволяет отобрать из них наиболее рациональные, по которым далее проводится параметрическая оптимизация. Таким образом, алгоритм оптимального проектирования ВСЗП (рис. 3) предусматривает последовательное решение многовариантных и многокритериальных задач синтеза и анализа на различных уровнях.

Для выбора схемы ВСЗП (II уровень) и способа уравнивания (компенсации) центробежных сил разработана морфологическая модель, представленная морфологической матрицей (из соображений конфиденциальности не раскрывается).

$$M_{ВСЗП} = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 \\ 1.3 & 2.3 & 3.3 & 4.3 \\ 1.4 & 2.4 & 3.4 & 4.4 \\ 1.5 & & 3.5 & 4.5 \\ & & 3.6 & 4.6 \\ & & & 4.7 \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cccccc} 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 & 10.1 & 11.1 \\ 5.2 & 6.2 & 7.2 & 8.2 & 9.2 & 10.2 & 11.2 \\ & & & & & & 11.3 \end{array} \right| \end{array} \quad (2)$$

В табл. 1 представлены варианты синтезированных схем ВСЗП: X_1 - рычажно-кулачковый за счёт уравнивания центробежной силы грузом, связанным с рычагом зубчатой передачи (рейка-сектор); X_2 - рычажно-кулачковый за счёт закрытия силового контура патрона конусной втулкой с конической (клиновой) внутренней поверхностью, взаимодействующей с клиновой поверхностью кулачка; X_3 - рычажно-кулачковый-усовершенствованный вариант X_2 с использованием тел качения создающих дополнительную центробежную силу $F_{об}$.

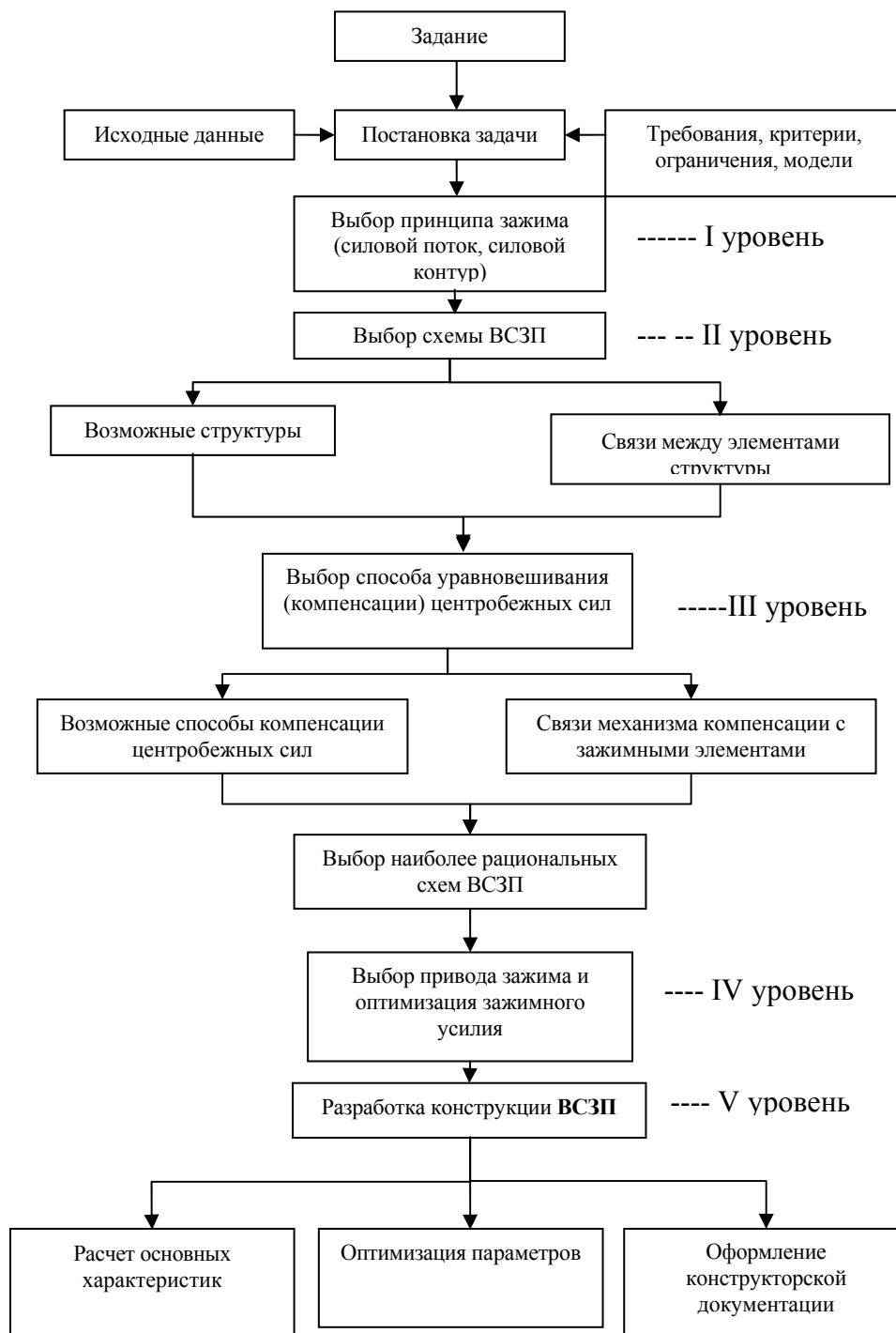


Рис. 3. Алгоритм оптимального проектирования ВСЗП

Таблица 1

Синтезированные рычажно-кулачковые ВСЗП с использованием груза и зубчато-реечной передачи и закрытием силового контура в продольной плоскости YZ

Вариант	X ₁	X ₂	X ₃
Схема ВСЗП			
Морфологическая формула	1.1-2.1-3.4-4.7 ^5.1-6.1-7.2-8.1-9.2-10.2-11.1	1.1-2.1-3.6-4.1 ^5.2-6.2-7.1-8.2-9.1-10.2-11.1	1.1-2.1-3.2-4.1 ^5.1-6.2-7.1-8.2-9.1-10.2-11.1

Оригинальные схемы ВСЗП с уравниванием в плоскости YZ (перпендикулярной оси патрона) представлены в табл. 2.

Лучшие варианты схем ВСЗП с учетом конкретных условий (тип Лучшие варианты схем ВСЗП с учётом конкретных условий (тип станка, тип привода) на IV уровне выбираются по качественным и количественным критериям, после чего приступают к разработке конструкции (V уровень) с расчетами по результатам теоретических исследований [1-56].

Таблица 2

Синтезированные рычажно - кулачковые ВСЗП с компенсацией центробежных сил в поперечной плоскости при передаточно - усилительном звене в продольной плоскости YZ

	Схема ВСЗП	Морфологическая формула	Вариант	Схема ВСЗП	Морфологическая формула
X ₄		$ 1.1-2.1-3.1-4.3 ^{\wedge}5.1-6.1-7.1-8.2-9.2-10.1-11.3 $	X ₆		$ 1.1-2.1-3.1-4.5 ^{\wedge}5.1-6.1-7.1-8.2-9.2-10.1-11.3 $
X ₅		$ 1.1-2.1-3.4-4.4 ^{\wedge}5.1-6.1-7.1-8.2-9.2-10.1-11.3 $	X ₇		$ 1.1-2.1-3.5-4.5 ^{\wedge}5.1-6.1-7.1-8.2-9.2-10.1-11.3 $

По результатам теоретических и экспериментальных исследований предлагаются технологические, конструктивные и эксплуатационные рекомендации. Так, например, предложены некоторые конструктивные способы увеличения жесткости стыков кулачков - направляющие (рис. 4).

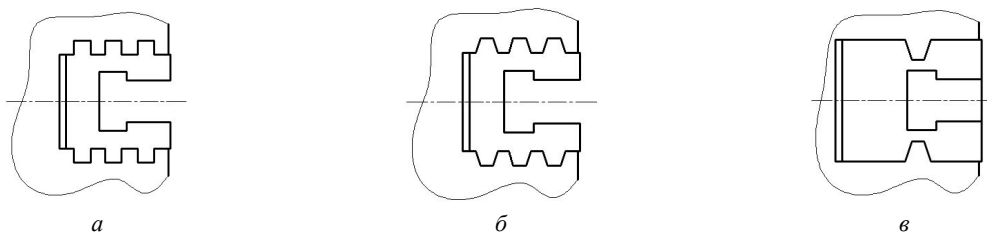


Рис. 4. Конструктивные пути повышения жесткости стыка кулачок-направляющие с использованием направляющих а – рис.4.а нескольких прямоугольных, б – рис.4.б нескольких трапецидальных, в – рис. 4.в в виде одной трапеции

Выводы:

1. Разработанная методика проектирования и расчёта ВСЗП, которая включает выбор принципа зажима, структурный, схемный и параметрический синтез, создаёт реальные предпосылки для автоматизированного проектирования ВСЗП.

2. Разработанные конструктивные рекомендации по повышению жесткости стыков позволяют повысить максимально допустимые частоты вращения ВСЗП.

3. Для обеспечения безаварийной работы предложено ряд новых ВСЗП, синтезированных методом морфологического анализа.

Анотація. Затискні патрони виконують одну з важливих ролей у процесі високошвидкісної обробки на верстатах з ЧПУ. І часто виникає проблема дії відцентрових сил на радіальну силу затиску. Проаналізувавши залежність «відцентрові сили - сила затиску» при точінні, а також різні способи компенсації відцентрових сил, був розроблений алгоритм оптимального проектування високошвидкісних затискних патронів. Запропоновано нові важільно-кулачкові затискні патрони і деякі конструктивні способи збільшення жорсткості стиків кулачок-напрямки.

Ключові слова: високошвидкісний затискний патрон, морфологічний аналіз, відцентрові сили, радіальна сила затиску.

Abstract. Purpose. To study the change of radial force of a clamp of the chuck when processing on the lathe with CNC at high speeds. Influence of centrifugal forces and methods of their compensation. To offer rational algorithm for design of high-speed clamping cartridges. **Design/methodology/approach.** Proceeding from already known recommendations about creation of the new clamping chucks, and also from results of the analytical researches, the flowchart of design consisting of five levels was made. At each stage these or those technical recommendations are considered. The choice of the best options is made based on the system morphological approach. **Findings.** The technique (algorithm) of design and calculation of high speed clamping chucks, recommendations about rigidity increase is developed. New high-speed clamping chucks were offered after using the algorithm. **Keywords:** high-speed clamping chuck, morphological analysis, centrifugal

Библиографический список использованной литературы

1. Кузнецов Ю.Н. Зажимные механизмы и технологическая оснастка для высокоэффективной токарной обработки: Монография / Ю.Н. Кузнецов, О.И. Драчев, И.В. Луцив, А.В. Шевченко, В.Н. Волошин. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. –480с.
2. Кузнецов Ю.Н. Повышение динамического качества системы патрон-деталь пруткового автомата / Ю.Н. Кузнецов, В.И. Сидорко, А.А. Вачев // Станки и инструмент.- 1987.- №12, с.13-15.
3. Кузнецов Ю.Н. Анализ динамической системы шпиндель-патрон-деталь токарного автомата / Ю.Н. Кузнецов//Вестник машиностроителя.- 1990.- №8, с. 42-47.
4. Кузнецов Ю.Н. Исследование силовых характеристик зажимного патрона, работающих на высоких частотах вращения / Ю.Н. Кузнецов, Ф.В. Эль-Дахаби // Вестник НТУУ «КПИ», серия машиностроение.- 2004.- №45с.
5. Кузнецов Ю.М. Силові характеристики токарних патронів з позиційними багатaproфільними затискними елементами / Ю.М. Кузнецов, В.Н. Волошин // Вісник ТДГУ,-2004.-Том 9, №3.-С. 43-48.
6. Орликов М.Л. Проектирование зажимных механизмов автоматизированных станков: Монография / М.Л. Орликов, Ю.Н. Кузнецов М.: Машиностроение, 1977.-142 с.
7. Проников А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем. Справочник-учебник. В 3-х томах. Т 2. Расчет и конструирование узлов и элементов станков./А.С. Проников, Е.И. Борисов, В.В. Бушуев и др. Под общ. ред. А.С.
8. Кузнецов Ю.Н. Самонастраивающиеся зажимные механизмы: Справочник. /Ю.Н. Кузнецов, А.А. Вачев, С.П. Сяров, А.Ц. Цървеников; под ред. Ю.Н. Кузнецова.–К.: Техника; София: Гос. изд-во "Техника", 1988-222 с.
9. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: Монографія: /В.Б. Струтинський – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 616с.

References

1. Kuznecov Yu.N., Drachev O.I., Luciv I.V., Shevchenko A.V., Voloshin V.N. Zazhimnye mehanizmy i tehnologicheskaja osnastka dlja vysokoeffektivnoj tokarnoj obrabotki [Clamping mechanisms and industrial equipment for highly effective turning], Monograf, Staryj Oskol: TNT, 2014. 480p.
2. Kuznecov Ju.N., Sidorko V.I., Vachev A.A. Povyshenie dinamicheskogo kachestva sistemy patron-detal' prutkovogo avtomata [Increase of dynamic quality of system chuck-detail of the bars CNC machine], Stanki i instrument. 1987. No12, p.13-15.
3. Kuznecov Ju.N. Analiz dinamicheskoy sistemy shpindel'-patron-detal' tokarnogo avtomata [Analysis of dynamic system spindle-chuck-detail of the turning CNC machine], Vestnik mashinostroitelja. 1990. No8, p. 42-47.
4. Kuznecov Yu.N., Jel'-Dahabi F.V. Issledovanie silovyh harakteristik zazhimnogo patrona, rabotajushhjih na vysokih chastotah vrashhenija [Research of the force characteristics of the clamping boss working at high frequencies of rotation], Vestnik NTUU «KPI», Mashinostroenie. 2004. No45p.
5. Kuznecov Yu.N., Voloshin V.N. Silovye harakteristiki tokarnyh patronov s pozicionnymi bagataprofil'nimy zazhimnymi jelementami [Force characteristics of turning cartridges with positional bagataprofil'nima clamping elements], Vestnik TGTU, 2004. Tom 9, No3. P. 43-48.
6. Orlikov M.L., Kuznecov Yu.N. Proektirovanie zazhimnyh mehanizmov avtomatizirovannyh stankov [Design of clamping mechanisms of automated machines], Monograf, Moscow: Mashinostroenie, 1977. 142 p.
7. Pronikov A.S., Borisov E.I., Bushuev V.V. i dr. pod obshh. red. A.S. Proektirovanie metallorzhushhjih stankov i stanochnyh sistem [Design of metal-cutting machines and machine systems], Spravochnik-uchebnik. V 3-h tomah. T 2. Raschet i konstruirovaniye uzlov i jelementov stankov.
8. Kuznecov Yu.N., Vachev A.A., Sjarov S.P., Crvenikov A.C. pod red. Kuznecova Yu. N. Samonastravajushhiesja zazhimnye mehanizmy [The self-setting-up clamping mechanisms], Spravochnik. Kiev: Tehnika; Sofija: Gos. izd-vo "Tehnika", 1988-222 p.
9. Strutinskij V.B. Matematicheskoe modelirovanie processov i sistem mehaniki [Mathematical simulation of processes and systems of mechanics], Monograf: Zhitomir: ZhITI, 2001. 616p.

Подана до редакції 22.12.2014