

УДК 621.91.05-52

Р. Г. КУДОЯРОВ, Е. М. ДУРКО, Д. В. ИВАНОВ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МЕХАТРОННОГО СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Приведены сведения о выполненных разработках, к которым относятся общая и частные методики автоматизированного проектирования мехатронного станочного оборудования, программы автоматизированного расчета компоновок станков и мехатронный хонинговальный станок для изготовления высокоточных деталей. Автоматизация проектирования; мехатронное станочное оборудование; модули и компоновки станков; моделирование приводов и деталей несущей системы

Изготовление качественных и надежных машин неразрывно связано с созданием перспективного оборудования и новых технологий. Этим задачам отвечают мехатронные станочные системы, обеспечивающие возможность реализации управляемых технологий изготовления комплектующих деталей и сборки изделий [1–3]. Управляемый процесс обработки при изготовлении деталей характеризуется наличием структурных связей (рис. 1), которые учитывают процессы, происходящие в приводах модулей станка, состоянии несущей системы и физические явления, сопровождающие процесс резания. От реализации этих связей зависит эффективность применения станка в производстве. В наиболее перспективных вариантах управление должно осуществляться с учетом реальных условий обработки и достижения требуемых показателей качества деталей.

Мехатронная станочная система представляет совокупность мехатронных модулей и устройств, обеспечивающих выполнение необходимых функций, связанных с осуществлением управляемого процесса обработки при изготовлении деталей.

В соответствии с разработанной классификацией [4] функциональные подсистемы мехатронных станочных систем подразделяются на 4 уровня, причем подсистемы каждого предыдущего уровня являются системой по отношению к подсистемам следующего уровня.

Подсистемы 1-го уровня обеспечивают необходимые виды исполнительных движений и представляют собой мехатронные модули — основные и вспомогательные, простые и комбинированные. Подсистемы 2-го

уровня различаются в зависимости от реализуемых параметров исполнительного движения. К ним относятся подсистемы обеспечения пуска и останова, реверсирования, скорости, перемещения и траектории исполнительного движения. Подсистемы 3-го уровня обеспечивают особенности реализации параметров движений при изготовлении деталей на станках, подсистемы 4-го уровня связаны с видами действий при управлении, которые подразделяются на осуществляемые по программе, в режиме адаптации и интеллектуальные.

Для повышения эффективности современного машиностроительного производства актуальным является создание методологии автоматизированного проектирования мехатронного станочного оборудования, включающей разработку общей и частных методик, программ расчета компоновок, и разработка конкретных мехатронных станков.

**ОБЩАЯ МЕТОДИКА
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННОГО
СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

На основе анализа опыта и направлений развития современного станкостроения установлено, что при создании мехатронного станочного оборудования целесообразно осуществление определенной последовательности операций, которая может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 2).

Техническое задание на проектирование станка должно предусматривать анализ сведений об обрабатываемых деталях и требований производства.



Рис. 1. Структурные связи управляемого процесса изготовления детали

С учетом перспектив развития предприятия устанавливается необходимый уровень повышения технико-экономических показателей (ТЭП) станка. При этом учитываются требования по эффективности и надежности производства, которые могут определяться на основании анализа действующего производства при изготовлении аналогичных деталей. Под надежностью технологического процесса (ТП) понимается гарантированное обеспечение требуемого качества деталей, выраженное, например, в относительном ужесточении норм точности при изготовлении.

Автоматизированное проектирование (АПР) технологического процесса (операции) имеет целью уточнение маршрутной технологии изготовления детали-представителя и разработку операций, для осуществления которых предназначен проектируемый станок. При этом должны учитываться результаты исследований в области создания перспективных управляемых процессов обработки аналогичных деталей. Разработку технологической документации рекомендуется производить с использованием современных САПР ТП и ППП типа SolidWorks, Smar-Team, Stalker, ТехноПро, ADEM, Power mill и др.

На этапе **технологического обоснования станка** должно осуществляться определение характерных сочетаний технологических условий использования проектируемого станка при изготовлении заданных деталей.

С учетом этого производится расчет предельных режимов резания, затем анализ технических характеристик аналогичного оборудования и выбор технических характеристик проектируемого станка.

Моделирование приводов, несущей системы и системы управления предусматривает разработку и исследование имитационных, структурных и динамических моделей станка с целью определения ожидаемых отклонений относительного расположения детали и инструмента и условий виброустойчивой работы станка.

На основании результатов моделирования предусмотрена **разработка алгоритмов повышения ТЭП**. В данном случае определяются методы компенсации неточности станка, уточняются алгоритмы работы и производится разработка блок-схем контуров системы адаптивного или интеллектуального управления.

Автоматизированное проектирование мехатронного станка, осуществляемое с учетом результатов моделирования, предусматривает определение состава модулей, функциональных подсистем и разработку структуры, кинематической схемы, конструкции каждого модуля и всего станка. Данные разработки осуществляются в виде регламентируемой конструкторской документации на станок, установленной для этапов проектирования (техническое предложение, эскизный, технический и рабочий проекты).



Рис. 2. Структура процесса создания мехатронного станочного оборудования

На основании этой работы определяют технико-экономические показатели (ТЭП) разработанного станка.

При автоматизированном проектировании мехатронного станочного оборудования целесообразно учитывать разработки ЭПИМСа и МГТУ «Станки» по созданию подсистем САПР главного привода, привода подачи и шпиндельного узла, комплекса инженерных расчетов и др.

ЧАСТНЫЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА КОМПОНОВОК МЕХАТРОННЫХ СТАНКОВ

Уточнена методика автоматизированного проектирования модуля подачи мехатронного станка. На основании требований к качеству, необходимой производительности и се-

бестоимости деталей предусмотрено формирование исходных данных (рис. 3). С учетом возможных схем работы модулей и необходимых функциональных подсистем производится разработка вариантов структуры и кинематики модуля. Осуществляется выбор составных частей и их конструктивных параметров, после чего определяются расчетные нагрузки (силы резания, трения и инерции) и выполняется конструирование механизма привода.

На первом этапе параметры механизма находятся из условия обеспечения требуемой суммарной жесткости, определяемой на основании предварительных расчетов. Далее проводится создание уточненной имитационной модели привода подачи и исследование ее динамических характеристик и ожидаемых показателей обработки.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма автоматизированного проектирования модуля подачи: 1, 2 — связи, учитывающие несоответствие по структуре и конструкции

Структурная схема модели привода подачи должна учитывать характеристики электропривода и его управление, конструктивные особенности и поведение основных элементов механической части привода при изменении сил резания и трения в процессе работы.

Известно, что в начале движения подвижного объекта происходит не мгновенное увеличение величины силы трения до установившегося значения, а осуществляется переходный процесс с перерегулированием [5], что оказывает влияние на динамические характеристики привода, особенно в случае небольшой тяговой силы.

Предусмотрена возможность уточнения структуры и конструкции модуля в целях

обеспечения заданных характеристик и показателей. Следует учитывать, что при тех или иных схемах обработки на одном станке возможно получение различных показателей качества деталей. Если заданные требования по показателям обработки для первоначально выбранной схемы перехода не выполняются, принимается решение об ее изменении или производится уточнение конструкции привода модуля подачи с последующей проверкой. Другим способом повышения показателей обработки является коррекция управляющей программы на основе результатов моделирования с учетом обеспечения требуемого коэффициента технологической надежности модуля.

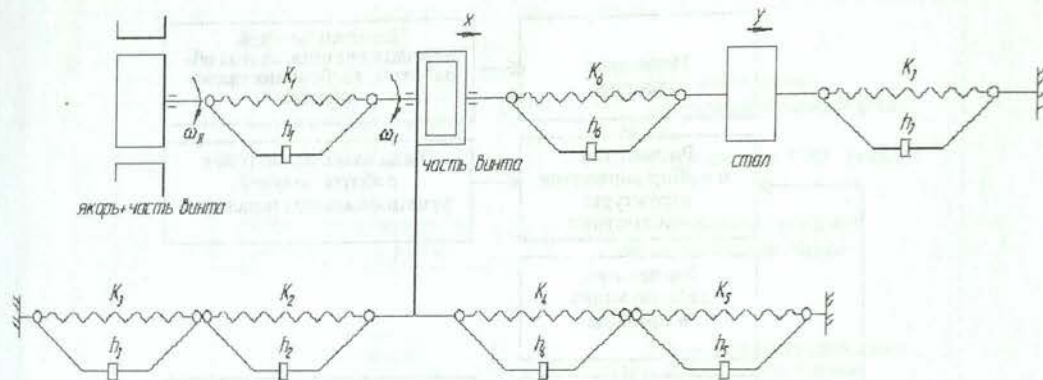


Рис. 4. Уточненная расчетная схема привода подачи модуля

В разработанной расчетной схеме привода подачи (рис. 4) учтены 3 сосредоточенные массы: якорь совместно с частью ходового винта, другая часть винта и перемещаемый рабочий орган. Принятые обозначения:

K_1, h_1 — крутильная жесткость и коэффициент демпфирования части якоря электродвигателя и ходового винта;

K_2, h_2, K_4, h_4 — осевая жесткость и коэффициенты демпфирования участков ходового винта;

K_3, h_3, K_5, h_5 — осевая жесткость и коэффициенты демпфирования опорных подшипников качения;

K_6, h_6 — осевая жесткость и коэффициент демпфирования передачи винт-гайка качения;

K_7, h_7 — жесткость и коэффициент демпфирования, характеризующие процессы трения в направляющем устройстве.

Топологические уравнения для участков модели

$$M_{\text{я}} - M_{\text{y1}} - M_{\text{дхв}} - M_{\text{и1}} = 0, \quad (1)$$

$$M_{\text{y1}} + M_{\text{дхв}} - M_{\text{y2}} - M_{\text{двм}} - M_{\text{и2}} = 0, \quad (2)$$

$$F_{\text{y2}} + F_{\text{двм}} - F_{\text{джт}} - F_{\text{трк}} - P_x - F_{\text{и3}} = 0, \quad (3)$$

где $M_{\text{я}}$ — момент на якоре электродвигателя, $M_{\text{y1}}, M_{\text{и1}}, M_{\text{дхв}}$ — упругий, инерционный и диссипативный моменты на ходовом винте, $M_{\text{y2}}, M_{\text{и2}}, M_{\text{двм}}$ — упругий, инерционный и диссипативный моменты на гайке винтового механизма, $F_{\text{y2}}, F_{\text{двм}}, F_{\text{и3}}$ — упругая, инерционная и диссипативная силы на исполнительном органе, $F_{\text{трк}}, F_{\text{джт}}$ — силы трения и демпфирования в направляющем устройстве, P_x — осевая сила резания.

Общее топологическое уравнение определяется на основании предыдущих уравнений

$$\frac{2(M_{\text{я}} \pm M_{\text{и1}} \pm M_{\text{и2}})}{d_0} \pm \pm F_{\text{и3}} - F_{\text{джт}} - F_{\text{трк}} - P_x = 0, \quad (4)$$

где d_0 — диаметр окружности центров шариков винтовой передачи.

На основе расчетной схемы (рис. 4) разрабатывается модель привода подачи в виде обобщенной структурной схемы, которая может быть реализована и исследована с помощью пакета Simulink в системе MATLAB.

Ниже приведены результаты имитационного моделирования [6] привода модуля подачи многоцелевого станка модели 250V, выпущенного Стерлитамакским станкостроительным заводом. Известно, что контурная обработка детали может сопровождаться автоматическим реверсированием движения, обеспечиваемого приводом. Поэтому уделялось внимание определению условий работы привода для быстрого и плавного реверсирования движения стола привода. Установлено, что основное влияние на время переходного процесса оказывает характер управляющего воздействия, масса перемещаемого объекта, сила сопротивления, а также демпфирование направляющих.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости снижения массы подвижной части и повышения коэффициента демпфирования направляющих качения с учетом условий обработки. На рис. 5 показано изменение времени переходного процесса для привода подачи стола станка модели 250V в зависимости от коэффициента демпфирования направляющего устройства. По итогам данной работы разработаны рекомендации по усовершенствованию конструкции многоцелевого станка модели 250V.

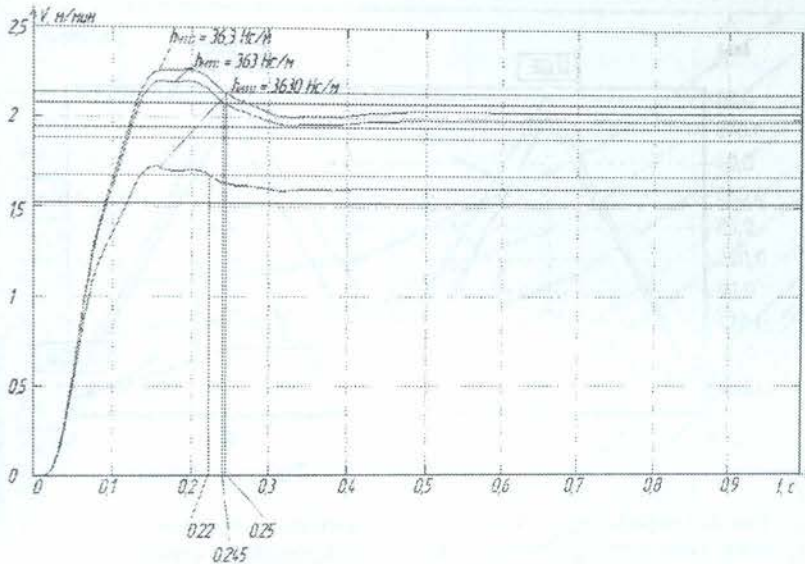


Рис. 5. Влияние коэффициента демпфирования направляющих на время переходного процесса при работе модуля подачи

Программы автоматизированного расчета компоновок мехатронных станков разработаны с учетом рекомендаций, приведенных в работах [7, 8]. Программы выполнены в среде Borland Delphi 6.0 и позволяют проводить расчеты на точность и податливость компоновок станков распространенных типов. Предусмотрена возможность анализа вариантов компоновок по обобщенным критериям. В программах сделаны допущения, позволяющие упростить расчеты и производить анализ элементов, которые зависят только от компоновки и характеризуют ее. В частности, не учитывается податливость привода подач, поскольку она присутствует во всех рассматриваемых компоновках.

При запуске программы выводится главное окно, где предлагается выбрать один из возможных типов компоновок станка и ввести координаты рабочей зоны. Задаются координаты расчетных точек рабочего пространства, которые должны быть определены предварительно по технологическим условиям работы станка.

В диалоговом режиме для конкретного подвижного сопряжения узлов станка устанавливается тип направляющего устройства (скольжения, качения с ташкетками или с расщепленными телами качения). При выборе направляющего устройства необходимо ввести его геометрические параметры, указать допустимые отклонения, коэффициент податливости и некоторые другие данные. Программа предусматривает подсказки при вводе данных в ячейки окна.

Расчет производится в диалоговом режиме, при этом программа предоставляет возможность выбора компоновок с различными сочетаниями направляющих устройств. При неправильном вводе программа выводит сообщение об ошибке и предлагает заменить неверное значение. Расчет проводится в частных координатах элемента компоновки, затем в автоматическом режиме результаты расчета приводятся к координатам станка.

В качестве примера на рис. 6 показан график изменения геометрической точности компоновки токарного станка в расчетных точках рабочей зоны.

Использование разработанных программ автоматизированного расчета при проектировании мехатронного станка позволяет провести анализ и сравнение показателей геометрической точности и податливости различных вариантов компоновок и выбрать из них лучший вариант. Результаты расчета выбранной компоновки станка также могут быть использованы для коррекции управляющей программы.

Разработанная методика исследования напряженно-деформированного состояния деталей несущей системы учитывает особенности составления расчетных схем при проектировании станков и использования результатов моделирования. Предусмотрено определение деформаций деталей несущей системы в характерных точках и в виде значений, приведенных к точке контакта «инструмент-деталь».

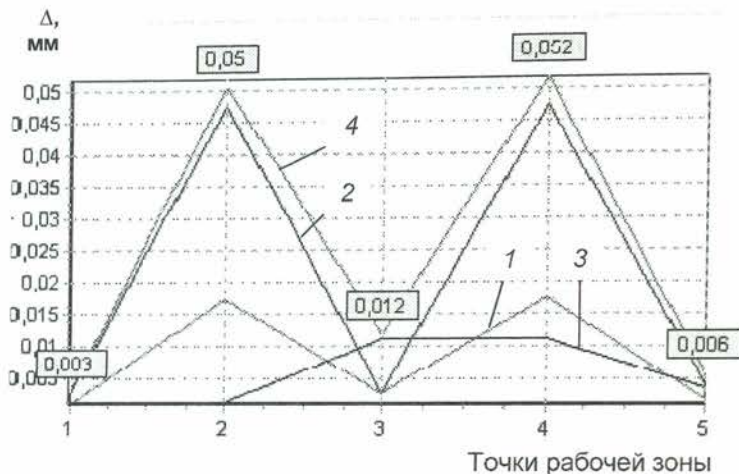


Рис. 6. График отклонений относительного расположения точки контакта «инструмент-деталь» в рабочей зоне токарного станка: 1 — по оси h ; 2 — по оси b ; 3 — по оси l ; 4 — результирующие

Значительную роль в получении достоверных данных имеет адекватное представление реальной конструкции в виде модели. В общем случае корпусная деталь несущей системы станков может быть представлена в виде твердого тела, если ее габариты сопоставимы, или — в виде оболочки при малой толщине стенки корпуса. Анализ показал, что конструктивные особенности деталей рассматриваемого типа могут быть наиболее полно учтены при применении первого метода. В дальнейшем модель подвергается разбивке сеткой конечных элементов (КЭ) [9, 10]. Для создания и исследования моделей целесообразно использование пакетов при-

кладных программ APM WinMachine и SolidWorks последних версий.

Ниже приведены результаты моделирования корпуса шпиндельной бабки токарного станка с ЧПУ модели 160НТ, который располагается на станине с возможностью продольного перемещения в процессе обработки детали. К числу внешних нагрузок (рис. 7) относятся: силы резания, приведенные к стенкам отверстия в корпусе (N_C , N_B); тяговое усилие от ходового винта (F_T) и реакции в опорах P_P . В качестве внутренних нагрузок учитывались силы, действующие в приводе, — усилие натяжения ремня и силы реакции в опорах электродвигателя.

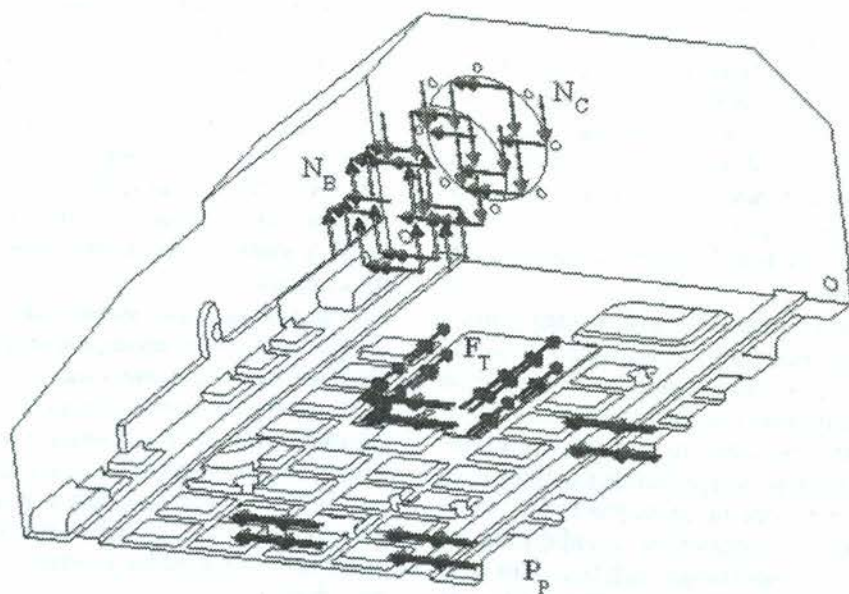


Рис. 7. Схема нагружения корпуса шпиндельной бабки токарного станка мод. 160НТ

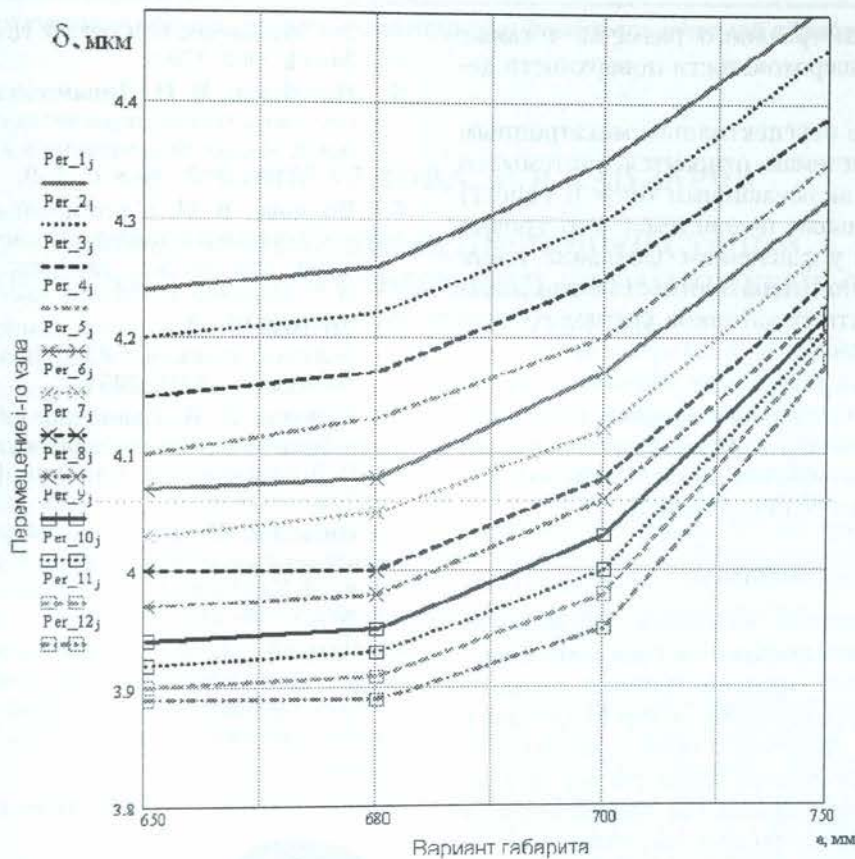


Рис. 8. Отклонения точек кромки базирующего отверстия корпуса шпиндельной бабки при различной ее ширине для токарного станка мод. 160НТ

При моделировании с учетом расчетных нагрузок определялись рациональные размеры шпиндельной бабки — ширина корпуса, высота расположения базового отверстия под шпиндель и его расположение относительно передней стенки корпуса. При различных величинах указанных параметров находились деформации узловых точек кромки торца базирующей поверхности на передней стенке корпуса. На рис. 8 показаны графики перемещения узловых точек кромки при различной ширине корпуса.

Для оценки влияния деформации корпуса шпиндельной бабки на точность обработки величина отклонения в характерных точках базирующей поверхности приводилась к точке контакта «инструмент–деталь». При этом шпиндель и деталь были представлены в виде жесткого вала, в данном случае условно использовался материал, практически не деформирующийся при расчетных нагрузках.

Моделирование напряженно-деформированного состояния корпуса шпиндельной бабки станка модели 160НТ показало целесообразность изменения его ширины с 680 до

650 мм и высоты расположения отверстия под шпиндель с 170 до 160 мм.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

На кафедре АТС УГАТУ совместно со Стерлитамакским станкозаводом разработан мехатронный хонинговальный станок, предназначенный для изготовления высокоточных деталей методом алмазного хонингования. Данный станок содержит модули главного вращательного и возвратно-поступательного движений и модуль дозированной радиальной подачи с функциональными подсистемами, обеспечивающими автоматическое управление режимом обработки с учетом достижения наибольшей равномерности удельной работы, производимой брусками, и обеспечения повышенной стойкости формы инструмента [4]. В данном случае реализованы структурные связи 1-2-5-1 и 1-4-5-1 (рис. 1). Использование станка с указанными функциональными подсистемами в условиях автоматизированного производства обеспечивает повышенные показатели точности

формы и диаметального размера, а также стабильность шероховатости поверхности деталей.

К наиболее перспективным мехатронным станочным системам относятся системы со структурами, включающими блок 6 (рис. 1) и функциональные подсистемы 4-го уровня с адаптивным управлением. Создание таких станков связано с необходимостью применения бесконтактных датчиков активного контроля и их введения в адаптивные контуры управления. Роль таких датчиков в мехатронных хонинговальных станках могут выполнять устройства контроля диаметра отверстия обрабатываемой детали и формы рабочей поверхности инструмента.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные методики автоматизированного проектирования и программы расчета компоновок предусматривают возможность целенаправленного конструирования мехатронного станочного оборудования для достижения требуемого качества изготавливаемых деталей и повышения эффективности машиностроительного производства.

2. В повышении качества мехатронного оборудования и его технологической надежности при автоматизированном проектировании имеет важное значение использование уточненных моделей привода и несущей системы, учитывающих реальные условия обработки.

3. При проектировании мехатронного станка необходимо предусматривать управление его работой с учетом конструктивных особенностей, показателей работы приводов, деформаций деталей несущей системы и обеспечения рациональных условий формообразования изготавливаемых деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подураев, Ю. В. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем / Ю. В. Подураев, В. С. Кулешов // Мехатроника. 2000. № 1. С. 5–10.
2. Зориктуев, В. Ц. Управление процессами механообработки деталей авиационных двигателей в условиях неопределенности / В. Ц. Зориктуев, А. Г. Лютов. М. : МАИ, 2003. 120 с.
3. Кудояров, Р. Г. Функциональные особенности интегрированных мехатронных станочных систем / Р. Г. Кудояров, В. Ц. Зориктуев // Мехатроника. 2005. № 9. С. 35–38.
4. Кудояров, Р. Г. Точность деталей машин при алмазном хонинговании : монография) /

Р. Г. Кудояров; под ред. В. Ц. Зориктуева. М. : МАИ, 2002, 170 с.

5. Пожбелко, В. И. Динамическое моделирование силы трения в расчетах станков на плоскость малых перемещений / В. И. Пожбелко // СТИИ. 2002. № 8. С. 5–9.
6. Волкова, В. Н. Системный анализ и принятие решений: словарь-справочник : учеб. пособие для вузов / под ред. В. И. Волковой, В. П. Козлова. М. : Высш. шк., 2004, 616 с.
7. Врагов, Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков / Ю. Д. Врагов. М. : Машиностроение, 1978. 205 с.
8. Бушуев, В. В. Станочное оборудование автоматизированного производства / под ред. В. В. Бушуева. М. : Станкин, 1993. Т. 1. 580 с.; Т. 2. 650 с.
9. Кирилин, Ю. В. Исследование несущей системы станка методом конечных элементов / Ю. В. Кирилин, Н. В. Еремин // СТИИ. 2002. № 8. С. 19–21.
10. Замрий, А. А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure3D / А. А. Замрий. М. : АПМ, 2004. 208 с.

ОБ АВТОРАХ



Кудояров Ринат Габдулхакович, проф. каф. автоматизир. технологическ. систем. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1963). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию механич. и физ.-техн. обработки (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. мехатронных станочных систем.



Дурко Евгений Маркович, доц. той же каф. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1968). Канд. техн. наук по технол. и оборуд. механ. и физ.-техн. обработки (защ. в Мосстанкине, 1973). Иссл. в обл. динамики мехатронных станочных систем.



Иванов Денис Владимирович, аспирант той же каф. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 2004). Готовит дис. в обл. металлорежущих станков.