

**Ключевые слова:**

точность станка, коррекция и компенсация погрешностей, математические, экспериментальные и экспериментально-математические методы оценки точности, детерминированные, статистические и вероятностные методы оценки точности

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ: КОМПЕНСАЦИЯ, КОРРЕКЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ 1

Александр КУЗНЕЦОВ

Описаны основные методы оценки характеристик точности станка. Через анализ и классификацию выходных параметров станка, определяющих его точность, рассмотрены основные виды возникающих погрешностей: положения, движения, состояния. Рассмотрены и классифицированы существующие в настоящее время методы оценки точности металлорежущих станков: математические, экспериментальные и экспериментально-математические. По виду преобразуемой информации методы оценки точности станков классифицированы как детерминированные, статистические и вероятностные.

Надо признаться, что попытка трактовать естественные проблемы без геометрии есть попытка сделать невозможное.

Галилео Галилей

Точность является ключевым параметром, используемым для оценки свойств станка. В современном механообрабатывающем производстве требования к высокой, прецизионной и ультрапрецизионной точности обработки деталей постоянно возрастают, а высокоточная обработка является обязательным условием качества, выпускаемой продукции.

Характер изменения во времени величин достижимой точности обработки изделий для станков нормальных, прецизионных, высокопрецизионных и ультрапрецизионных, а также скорость изменения точности практически одинаковые для станков разных классов точности, при этом сами показатели точности могут отличаться на порядок. Так, для металлорежущих станков традиционных методов обработки (токарных, фрезерных, расточных и т.п.) достижимая точность обработки в настоящее время находится в диапазоне 1–5 мкм и, если указанная

тенденция сохранится, то в ближайшие 10–15 лет может быть достигнут стабильный диапазон точностей в пределах 0,1–1 мкм. Это, естественно, потребует значительных усилий по исследованию процессов и механизмов достижения и обеспечения точности во всем спектре проблем – от проектирования и производства станков до систем управления их поведением (в смысле управления параметрами точности) в период их эксплуатации при обработке изделий.

Непосредственная оценка характеристик точности станка дает возможность проводить качественное и количественное определение влияния различных конструктивных, технологических и иных факторов на точность обрабатываемых изделий и создает все необходимые предпосылки для разработки средств и методов управления рассматриваемыми свойствами точности станка при проектировании, изготовлении и экс-

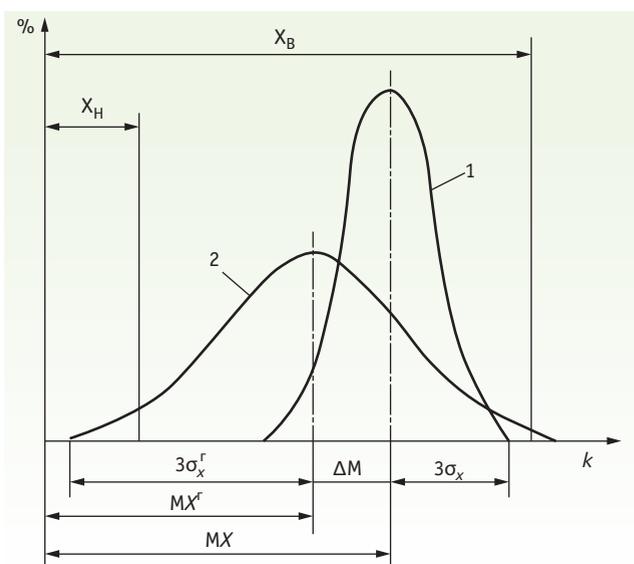


Рис. 1. Соотношение распределения характеристик точности станка модели 1 и группы моделей однотипных станков 2

плуатации. Однако эта оценка точности станка не может гарантировать стабильную точность обработки в определенном диапазоне даже на станках, выпускаемых одним заводом. Характерные кривые распределения k -й характеристики точности станка модели 1 и этой же характеристики точности для группы однотипных станков этой же модели 2 приведены на рис. 1.

Отношение математических ожиданий $M\bar{X}^r/M\bar{X}=A_M$ и дисперсий $(\sigma_X^r/\sigma_X)^2=A_\sigma$ измеренных величин k -го параметра точности станка позволяет судить о стабильности процесса изготовления станков и степени влияния на k -й параметр точности станка случайных факторов. Предельным значением соотношений A_M и A_σ , очевидно, следует считать значение их величины, равной единице. В этом случае в процессе производства и функционирования станка стабильно обеспечивается сохранение и взаимодействие факторов, обуславливающих формирование k -го параметра точности станка.

С другой стороны, достижение значения отношения $A_M = A_\sigma = 1$ практически нереализуемо, и можно говорить лишь о степени приближения к этой величине. В силу этого можно рассматривать лишь вопрос о вероятности нахождения k -го параметра точности в заданных пределах:

$$P(X_H \leq X \leq X_B) = \Phi\left(\frac{X_B - MX}{\sigma_X}\right) - \Phi\left(\frac{X_H - MX}{\sigma_X}\right),$$

где X_B и X_H — соответственно верхнее и нижнее допустимые значения величины k -го параметра точности.

Это обстоятельство является важным фактором для принятия решений при разработке методов и способов управления, коррекции или компенсации погрешностей на базе систем ЧПУ. В настоящее время в доступных открытых источниках информация об этом не встречается, а разработчики опций компенсации к системам ЧПУ, например Siemens 840Dsl Compensations или Heidenhain TNC530 Error compensation, об этом не упоминают.

В настоящее время обеспечение точности обработки на станках с ЧПУ и применение соответствующих технологий приобретают все большее значение и привлекают внимание как производителей станков, так и их потребителей. Однако непрерывное повышение точности обработки только за счет увеличения точности самих станков приводит к непропорциональному повышению стоимости как самих станков, так и стоимости обработки на этих станках. Поэтому, очевидно, должен быть найден рыночный компромисс между требованиями к точности потребителей станков и создателями и производителями станков в отношении методов обеспечения и удовлетворения этих требований точности, а также стоимости процесса обработки и станков. Следовательно, можно и нужно находить сбалансированные методы обеспечения точности как при производстве станков, так и находить методы управления, коррекции или компенсации погрешностей и ошибок станков при их применении в процессе обработки деталей для гарантированного обеспечения требуемых параметров их точности. Таким образом, точность является ключевым параметром, используемым для оценки свойств станка.

Металлорежущий станок при анализе точности рассматривается как система, состоящая из множества деталей и узлов, которые в соответствии с заданными и осуществляемыми функциями делятся на две группы: неподвижные и подвижные. К ним относятся: станины, колонны, столы, салазки, каретки, направляющие, шпиндельные бабки и т.п., которые сами по себе в разных случаях могут быть как подвижными, так и неподвижными фиксированными (например, стол может быть как подвижным (с линейным перемещением или вращением), так и неподвижным, то есть фиксированным, колонна может также быть как подвижной, так и неподвижной и т.д.). Детали и узлы, в свою очередь, характеризуются присущими им параметрами, свойствами и характеристиками: геометрическими размерами и формой, физико-механическими характеристиками их материала, теплофизическими свойствами материала и параметрами теплообмена с окружающей средой и сопряженными элементами станка.

Неподвижные и подвижные детали и узлы станка через функциональные связи и отношения образуют различные структуры металлорежущего станка, которые в зависимости от способа их формирования (связей и отношений) могут характеризовать и определять следующие структуры: координатную, компоновочную, упругую, динамическую, тепловую, термоупругую и др.

Отношения между деталями и узлами, а также их связи определяются видом и характером взаимодействия: жестким (неподвижным), упругим, термоупругим и упругопластическим.

Изменение параметров, свойств, характеристик неподвижных и подвижных деталей и узлов, а также их функциональных связей и отношений происходят вследствие воздействия основных видов источников их дестабилизации, которые могут быть как постоянными, так и периодическими, случайными и систематическими, внутренними и внешними. Внутренние и внешние факторы воздействий, изменяя состояние элементов, деталей и узлов, приводят к нарушению (отклонению, изменению) первоначальных связей и отношений и тем самым приводят к деформациям или искажениям их свойств, параметров и характеристик.

Тогда выходные параметры, характеризующие свойства станка, будут определяться способностью системы сохранять требуемые положения, связи и отношения неподвижных и подвижных деталей и узлов, обусловленные их функциональными назначениями для осуществления требуемых функций и законов поведения. Иными словами, точность как свойство системы при системном рассмотрении также является результатом отражения взаимодействия структурных связей и отношений элементов системы, которые в данном случае порождают новую систему, основным свойством которой является точность.

По полноте информации о различных свойствах станка выходные параметры могут быть также разделены на три группы – частные, дифференцированные и интегральный:

- частные выходные параметры характеризуют различные свойства отдельных деталей, узлов, блоков и механизмов металлорежущих станков и обусловлены функционально обособленными элементами и деталями;
- дифференцированные выходные параметры – свойства узлов и деталей станка, объединенных общностью их функционального назначения и обусловленных взаимодействием двух и более деталей и элементов станка;
- интегральный выходной параметр – совокупность свойств станка, которые отражают объективные особенности его функционирования.

Частные и дифференцированные выходные параметры формируют свойства интегрального выходного параметра.

По причине возникновения отклонений выходные параметры можно разделить на три группы: положения, движения, состояния (рис. 2).

Погрешности положения обусловлены ошибками изготовления и монтажа, а также искажениями при эксплуатации узлов и деталей станка. К ним относятся такие погрешности, как, например, отклонение от перпендикулярности оси шпинделя к плоскости стола, отклонение от параллельности оси шпинделя направляющим, отклонения от параллельности/перпендикулярности направляющих и т.п.

Исходя из функционального назначения элементов станка погрешности положения определяют в виде характеристик взаимных положений в выбранной системе координат таких типовых геометрических элементов, как точка – точка, точка – линия, линия – линия, линия – плоскость, плоскость – плоскость и т.п.

Погрешности движения обусловлены ошибками изготовления, монтажа и управления подвижными элементами станка при их взаимодействии в процессе движения для выполнения заданного закона движения в соответствии с функциональными требованиями к нему. К ним относятся погрешности кинематические, функционирования, траектории движения рабочих органов, позиционирования, прямолинейности, скорости, ускорения и т. п. Следовательно, любые отклонения как в пространстве, так и во времени от заданного закона изменения таких их типовых геометрических элементов, как точка, линия, плоскость, объем или взаимного относительного движения подвижных деталей и узлов станка (или их центра масс) в выбранной системе координат типовых геометрических элементов (точ-



Рис. 2. Система погрешностей металлорежущего станка по причине их возникновения



Рис. 3. Составляющие функции состояний погрешностей станка

ка – точка, точка – линия, точка – плоскость, линия – линия, линия – плоскость, плоскость – плоскость) обуславливают и отражают требуемые функциональные законы их движения.

К погрешностям состояния относят отклонения свойств, параметров и характеристик узлов и деталей станка и их взаимных положений, вызванные изменением их состояния вследствие статических и динамических воздействий на них силовых, тепловых и других форм и видов энергии. К ним относятся, например, вибрации, упругие и тепловые деформации, износ и т.п. Тогда характеристики положения, движения или состояния деталей и узлов металлорежущих станков (как геометрических объектов твердых тел) могут быть измерены или описаны аналитическими зависимостями, определяются геометрическими параметрами и функциональными законами, обусловленными их назначением, положением в пространстве и их изменением во времени вследствие внутренних и внешних силовых и тепловых воздействий.

Перечисленные погрешности зависят от многих факторов, поэтому они являются функциями состояний узлов и деталей (элементов) станка. Под состоянием (рис. 3) в широком смысле этого слова понимается совокупность пространственных, временных и энергетических параметров, определяющих значения данной функции (параметра, погрешности, ошибки). Областью состояний для одноименной погрешности является множество значений погрешности внутри рабочего объема станка.

Следовательно, «точность» (accuracy), как понятие, содержательно отражает свойства размера (линейная или векторная величина) и, как понятие, содержательно отражает свойства и характеристики законов положения, движения, состояний и взаимодействий.



Рис. 4. Виды и соотношение геометрических погрешностей токарного станка

В более широком смысле слова и в более общем виде «точность» – степень соответствия свойств(а) предмета, объекта, системы, процесса, явления его номинальному, заданному, установленному, допустимому, идеальному значению.

Все это обуславливает, формирует и определяет совокупность погрешностей: геометрических, кинематических, упругих, динамических, температурных, а также погрешностей управления (аппроксимации) и Аббе – составляющих параметров общей точности металлорежущего станка, которые в отдельности в достаточной степени описаны, систематизированы и представлены в отечественных и зарубежных стандартах. На точность станка влияет множество факторов. Среди них доля геометрических ошибок составляет около 40% от общего числа ошибок, а 75% из них составляют ошибки изготовления и сборки (рис. 4). Эти ошибки главным образом обусловлены погрешностями изготовления и дефектами сборки, что обуславливает несоосность осей станка, погрешности положения и прямолинейности каждой оси, которые определяются главным образом ошибками рассогласования и плоскостности направляющих, ошибками размерных цепей (длины и связей деталей), угловыми ошибками, включая крен, тангаж и рыскания, ошибками прямолинейности, плоскостности, параллельности, ошибками перпендикулярности и нулевого положения (ошибка смещения).

Прогресс в обеспечении точности обработки и металлорежущих станков связан с разработкой и развитием методов моделирования точности и ее оценки (рис. 5). Существующие в настоящее время методы оценки точности металлорежущих станков могут быть классифицированы исходя из способа получения исходной информации, вида преобразуемой информации и полноты информации о свойствах станка.

Математические методы оценки точности основаны на создании и решении системы математических зависимостей, описывающих как отдельные свойства узлов и деталей станка, так и всего станка в целом. Эти методы обычно применяются при



Рис. 5. Методы оценки показателей точности станка

проектировании станков, когда требуется получить оценку, например, таких характеристик, как жесткость, теплостойкость и др. Применение математических методов может быть также эффективно при сравнительной оценке различных конструктивных вариантов. Сложность в получении достоверной оценки качества станка заключается в том, что описываемые математическим методом показатели качества должны учитывать различные по своей сущности физические процессы, а исходные данные, как правило, являются неполными, некорректно и недостоверно заданными. Поэтому математические методы в основном применяются для оценки отдельных свойств узлов, деталей и элементов станка.

Экспериментальные методы оценки точности станка базируются на проведении испытаний станка с целью регистрации и последующего сравнения полученных данных с их заданным допустимым уровнем точности. В результате получают оценки соответствия характеристик и свойств станка установленным значениям. Кроме того, экспериментально полученные данные используются для последующего проведения оценок качества станка по его различным свойствам. Экспериментальные методы в настоящее время применяются наиболее широко вследствие их относительной простоты, достоверности, низкой трудоемкости и хорошей воспроизводимости и повторяемости. Однако для получения характеристик качества станка обязательно требуется построение модели преобразования экспериментально полученных данных в выходные параметры точности станка.

Экспериментально-математические методы сочетают в себе как экспериментальные, так и математические способы получения исходной информации. Полученная таким образом информация в дальнейшем должна быть преобразована с помощью соответствующих моделей в оценку точности станка.

Получение исходной информации методом моделирования может осуществляться как физическим (натурным), так и математическим моделированием. В первом случае физическая модель должна соответствовать реальному объекту по анализируемым процессам и факторам. Физическая модель может быть выполнена как уменьшенная модель натурального образца или как модель, отражающая основные функциональные возможности (например, модель пары трения), или как модель протекания исследуемого процесса (например, модель электро-тепловой аналогии и т. п.). Во втором случае строится математическая модель оценки качества станка, которая реализуется с помощью средств вычислительной техники. Построение математической модели – чрезвычайно сложная и трудоемкая задача, хотя при наличии такой адекватной модели возможно решение задач не только оценки качества, но и проектирования станков с заданными свойствами.

По виду преобразуемой информации методы оценки точности станков можно разделить на детерминированные, статистические и вероятностные.

Детерминированные методы основаны на изучении и установлении характера или закономерности изменения выходного параметра станка от действующих факторов, то есть должна быть найдена функциональная зависимость между выходным параметром и входными возмущающими воздействиями, обусловленными узлами, деталями и механизмами станка, их свойствами, технологическими факторами и окружающей средой.

В общем виде функциональная связь между входными x_i и выходными R_j параметрами станка определяется выражением $R_j = f(x_{ji})$, где i, j – совокупность входных и выходных параметров соответственно.

Если станок имеет только один выходной параметр ($j = 1$), то выражение примет вид $R = f(x_{11} \dots x_{1i})$. Тогда абсолютная ошибка выходного параметра может быть найдена, если известны погрешности Δx_i входных параметров x_i , по зависимости $\Delta R = \sum_{i=1}^n \frac{\partial R}{\partial x_i} \Delta x_i$, предложенной акад. Н. Г. Бруевичем.

Следовательно, детерминированные зависимости позволяют описать процесс образования погрешности выходного параметра станка, определить его величину в каждом конкретном случае изменения

Комплектные системы управления

для производителей станочного оборудования и автоматизации нового производства

Балм-Систем
Balt-System

20 ЛЕТ ВМЕСТЕ
В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ
И СТАНКОСТРОЕНИИ!

- УСТРОЙСТВА ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ
- ПРИВОДЫ ПОДАЧ И ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ
- ДВИГАТЕЛИ
- ДАТЧИКИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ



ЗА ГОДЫ РАБОТЫ:

Произведено:

- более **22000** систем ЧПУ
- более **7000** электроприводов

Оснащены:

- более **5000** предприятий РФ, в том числе в стратегических отраслях
- более **200** предприятий Белоруссии

Работаем в **35** странах мира



www.bsystem.ru

Россия, 198206, г. Санкт-Петербург,
Петергофское шоссе, д. 73, корп. 9
Тел./факс: (812) 744-7059, 744-3461
E-mail: info@bssystem.ru

РАЗРАБОТКА

ПРОИЗВОДСТВО

ОБСЛУЖИВАНИЕ

ОБУЧЕНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ

входных воздействий, проследить и проанализировать механизм взаимодействия между входными и выходными параметрами, находить пути управления выходными параметрами. Однако детерминированные методы имеют ряд существенных недостатков, обусловленных сложностью установления указанной взаимосвязи между входными и выходными параметрами: точность получаемых результатов, относительно низкая, так как учитываются только наиболее значимые входные параметры, и, кроме того, случайные составляющие существенным образом влияют на величину и достоверность оценок выходных параметров в каждом конкретном случае.

Статистические методы оценки точности металлорежущих станков основаны на получении статистических показателей точностных параметров (математические ожидания, средние квадратические отклонения и др.) по результатам N измерений. Для этого широко используется хорошо развитый аппарат математической статистики. Указанные методы позволяют относительно просто и достаточно быстро получить статистические оценки точности станков, хотя природа образования и изменения точностного параметра, в отличие от детерминированного метода, не будет изучена.

Вероятностные методы оценки точности станков базируются на построении и изучении вероятностных моделей точностных параметров. При этом должна быть известна взаимосвязь «случайных» входных параметров x_i , (законы распределений и их характеристики считаются заданными) и выходного R_j . Тогда математическое ожидание $M(R)$ выходного параметра и его дисперсия $\sigma^2(R)$ будут соответственно равны:

$$M(R) = f[M(x_1) \dots M(x_n)]$$

и

$$\sigma^2(R) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) M \sigma^2(x_i) + 2 \sum_{j < i}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) K_{ij},$$

где K_{ij} – корреляционный момент величин x_i и x_j .

Если случайные величины x_i независимы, то дисперсия $\sigma^2(R)$ выходного параметра будет равна:

$$\sigma^2(R) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 M \sigma^2(x_i).$$

Следовательно, зная вероятностные характеристики случайных величин, можно находить показатели параметров точности металлорежущих станков (например, вероятность безотказной работы по выходному параметру), прогнозировать уровень надежности станка по одному или нескольким выходным параметрам, управлять его надежностью.

Аналогично методам оценки выходных параметров качества станков методы оценки точности так-

же могут быть частными, дифференцированными и интегральными, что обусловлено степенью и полнотой рассмотрения свойств станка, как единой системы.

В частности, в 1940–1960 годах были предложены расчетно-аналитические и статистические методы оценки точности (Соколовский А.П.), а также методы анализа размерных цепей (Балакшин Б.С.).

В период 1960–1980 годов появились новые подходы в объяснении и формировании параметров и характеристик точности, их взаимосвязей и взаимовлияний на конечные выходные показатели: объемная точность (Matthias E.), векторный анализ объемной точности (Schultchik R.), вероятностная модель изменения точности станка во времени (Пронииков А.С.), метод координатных систем с деформируемыми связями (Базров Б.М.).

В 1980–2000 годах происходило дальнейшее развитие методов описания механизмов формирования выходных параметров точности станка, углубление знаний о взаимодействии, взаимосвязях и взаимозависимостях между составляющими элементарных погрешностей: анализ составляющих погрешностей (Donaldson R.), вариационный метод расчета поведения станков (Решетов Д.Н., Портман В.Т.), геометрическое представление однородных преобразований координатных систем (Slocum A.), точность движений формообразования (shape generation) на основе однородных преобразований координатных систем (Moriwaki T., Sugimura N., Miao Y., Inasaki I., Kishinami K., Sakamoto S., Takeuchi Y., Tanaka F.), кинематика твердого (rigid) тела (квасистатическая) и однородные преобразования координатных систем (Kiridena V.S.B., Okafor A.C., Ertekin Y.M.).

В 2000–2020 годах повышение точности станков в дополнение к традиционным конструкторско-технологическим методам развивается на основе применения систем коррекции и управления с использованием функциональных возможностей систем ЧПУ на основе уже известных методов оценки точности, а также созданием различных их модификаций: на основе теории нейронных сетей (Chen J., Yang H., Lee, Mize C.D., Zeigert C., Ramesh R.), авторегрессионного анализа (Ni J.), грей-систем (Wangetal), статистические методы повышения геометрической точности (Knapp W.), используя кубические полиномы для создания математической модели (Bohez E.L.J., Ariyajunya B., Sinlapecheewa C., et al.) и др. Продолжаются работы по созданию системных представлений о точности станков, методов их оценки, моделированию объемных геометрических и тепловых погрешностей на основе различных математических методов их описания: объемные ошибки не твердого (non-rigid) тела (Wang C.,

Svoboda O., Bach P., Liotto G.), объемные 3D-ошибки твердого и не твердого тела (Mekid S., Jedrjiewski J., Kiong T.K., Wang C.), теория (MBS) кинематики многотельных систем (Schiehlen W.), метод (D-H) Денавита-Хартенберга (Lamikiz A., De Lacalle LNL, Ocerin O., et al.), структурная точность и точность образов, формируемых станком на основе функций поля состояний (Кузнецов А.П.), экспоненциальная модель преобразования (PoE – product of exponential) геометрических ошибок станка для их интеграции (Fu G., Fu J., Xu Y., Chen Z.), модель общих смещений из-за погрешностей частей деталей станка и обрабатываемой детали в системах координат КИМ (Jie Gu, John S.A., Kurgin S.), моделирование геометрических погрешностей и их компенсация с использованием винтовой теории (Moon S.K., Moon Y.M., Kota S., et al.).

В работах Cheng Q., Wu C., Gu P.H., Chang W.F., and Xuan D.S. (2013), Yang J., Mayer J.R.R., Altintas Y. (2015), Zhong X., Liu H., Chang H., Li B. (2018), Guo S., Tang S., Zhang D. (2019) также отмечается, что геометрические ошибки включают зависимые от позиции (положения) геометрические погрешности (PDGEs) и независимые от позиции (положения) геометрические погрешностей (PIDGEs). Ошибки

перпендикулярности (squareness) являются важными PIDGEs, в значительной степени влияющими на объемную ошибку. Измерение величины ошибки перпендикулярности обычно имеют низкую точность, учитывая общую погрешность моделирования и компенсации. PDGEs, такие как ошибки прямолинейности и угловые ошибки соответствующих осей, связаны с ошибками перпендикулярности или ошибками Аббе.

Важно отметить, что все математические методы направлены на построение наиболее адекватной и точной геометрической модели погрешностей станка и основаны на преобразовании исходных данных, полученных путем экспериментальных измерений элементарных геометрических составляющих структуры погрешностей положения и движения деталей и узлов станка.

КУЗНЕЦОВ Александр Павлович –

доктор технических наук, профессор кафедры станков МГТУ «СТАНКИН»

Продолжение статьи читайте в следующем номере журнала.

Интегрированная **CAD/CAM/CAPP** система **ADEM** для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства. Единый программный комплекс, в состав которого входят модули для: объемного и плоского моделирования; выпуска конструкторской и технологической документации; проектирования техпроцессов; программирования станков с ЧПУ (токарных, фрезерных, электроэрозионных, лазерных и др.); управления архивами и проектами; укрупненного трудового нормирования. Содержит средства для анализа технологичности проекта и систему управления справочными данными.

Группа компаний ADEM

107497, Москва:
ул. Иркутская, д. 11
тел: +(7) 495 462-0156,
+(7) 495 502-1341
e-mail: moscow@adem.ru

426003, Ижевск:
ул. Красноармейская, д. 69
тел: +(7) 3412 522-341,
+(7) 3412 522-433
e-mail: izhevsk@adem.ru

