

**Ключевые слова:**

точность, технико-технологическая система, достижимая точность, технологический уклад, методы обработки

ТОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ В ЕЕ ИСТОРИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ

ЧАСТЬ 2*

Александр КУЗНЕЦОВ

Представлен системный подход к различным методам оценки и контроля точности и качества металлорежущих станков. Дана историческая ретроспектива эволюции понятия «точность» применительно к металлорежущим станкам. Показаны тенденции и перспективы развития точности станков при смене технологических укладов

Для более достоверной оценки точности и качества станков необходимо определить такие выходные параметры, которые объективно отражают свойства станка, обусловленные его функциональным назначением, и могут быть рассчитаны, оценены и/или определены экспериментально.

Металлорежущий станок при анализе точности рассматривается как система (рис.10), 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 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 также может 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 и теплофизическими свойствами материала, 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 стан-

ка, 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.

John Loxham, основатель группы Cranfield Precision, первым ввел в оборот понятие детерминизма в контексте точки зрения инженеров-технологов, в соответствии с которой: «автоматические станки и измерительные машины совершенно повторяемые, как звезды и планеты». Детерминизм, в этом смысле, является одним из основополагающих принципов в проектировании, обеспечении и достижении точности станков. Предполагается, что нет такого понятия, как случайное поведение, каждая часть машины и процесса подчиняется причинно-следственным связям, которые могут быть объяснены на основании известных инженерных принципов. Детерминистский способ мышления не признает такого понятия, как «случайная ошибка». Считается, что любое поведение станка является результатом некоторых условий, которыми можно управлять, а перечень этих условий достаточно мал, что позволяет им управлять.

Изменение параметров, свойств, характеристик неподвижных и подвижных деталей и узлов, а также их функциональных связей и отношений проис-

* Начало в журнале «СТАНКОИНСТРУМЕНТ», 2017, № 3.

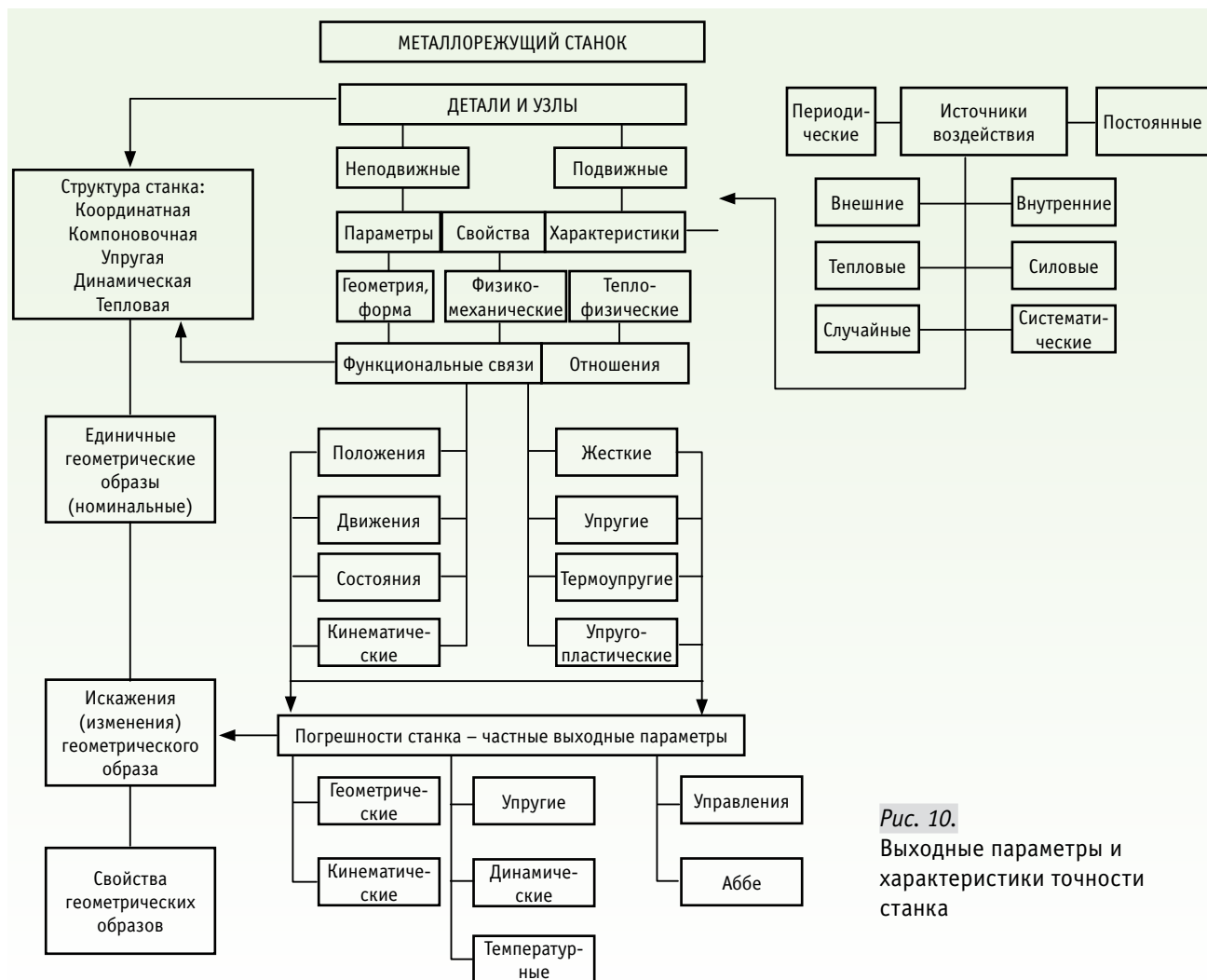


Рис. 10. Выходные параметры и характеристики точности станка

ходят вследствие воздействия основных видов источников их дестабилизации: силовых и температурных, которые могут быть как постоянными и периодическими, случайными и систематическими, внутренними и внешними.

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

Погрешности положения обусловлены ошибками изготовления и монтажа (а также износом) 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 определяются как характеристики взаимных положений в выбранной системе координат типовых геометрических элементов: «точка – точка», «точка – линия», «линия – линия», «линия – плоскость», «плоскость – плоскость» .

Погрешности движения обусловлены ошибками изготовления, монтажа и управления подвижными элементами станка. К ним относятся кинематические погрешности, погрешности функционирования, погрешности траектории движения рабочих органов, погрешность позиционирования и т. п. Следовательно, погрешности движения определяются как любые отклонения (в пространстве и во времени) от заданного закона изменения таких типовых геометрических элементов, как «точка», «линия», «плоскость», «объем», или взаимного относительного движения подвижных деталей и узлов станка в выбранной системе координат, для которой типовые геометрические элементы «точка – точка», «точка – линия», «точка – плоскость» «линия – линия», «линия – плоскость»,

«плоскость – плоскость» обуславливают и отражают требуемые функциональные законы их движения.

К погрешностям состояния относят отклонения, вызванные изменением состояния узлов и деталей станка вследствие статических и динамических воздействий на них силовых, тепловых и других видов энергии. К ним относятся, например, вибрации, упругие и тепловые деформации и т.п. В этом случае характеристики положения, движения или состояния геометрических объектов деталей и узлов металлорежущих станков могут быть описаны аналитическими зависимостями, которые определяют геометрические свойства их положения в пространстве и изменение состояния вследствие силовых и тепловых воздействий (см. рис. 10).

Все это обуславливает, формирует и определяет совокупность погрешностей (параметров точности) металлорежущего станка: геометрических, кинематических, упругих, динамических, температурных погрешностей, а также погрешностей управления (аппроксимации) и Аббе, которые (в отдельности) в достаточной степени описаны, систематизированы и представлены в отечественных и зарубежных стандартах. Рассмотренные погрешности зависят от многих факторов, поэтому они являются функциями состояний основных эле-

ментов. Под состоянием, в широком смысле этого слова, понимается совокупность пространственных, временных и энергетических параметров, определяющих значения данной функции. Областью состояний для одноименной погрешности является множество значений погрешности внутри рабочего объема станка.

Прогресс в обеспечении точности обработки и металлорежущих станков связан с развитием методов её моделирования и оценки, эволюция которых приведена в табл. 3. В частности, в 1940–1960 годы 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: векторный анализ объемной точности (Schultchik R.), вероятностная модель изменения точности станка во времени (Проникив 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

Таблица 3. Методы оценки точности металлорежущих станков

Автор	Годы публикаций	Методы исследования, анализа и оценки точности станка	Объект оценки. Показатели, параметры, характеристики оценки	Событие: техническое или технологическое / достижимая точность обработки, мкм
1	2	3	4	5
Н.Г. Бруевич	1941, 1946	Вариация функции входных и выходных параметров	Положение конечного звена	–/60
Н.А. Бородачев	1950	Теоретико-вероятностные и статистические методы	Деталь. Метрологические свойства детали	–
А.П. Соколовский	1952	Расчетно-аналитические и статистические методы оценки точности обработки и ее составляющих	Деформации и погрешности технологической системы	–
Б.С. Балакшин	1957	Размерные цепи	Деталь. Метрологические свойства детали	Числовое программное управление (NC)/30
А.С. Проникив	1971, 1982	Вероятностная модель изменения во времени точности станка. Программный метод испытаний	Изменение во времени выходных параметров точности станка	ШВП – 1969 г.; линейные направляющие качения – 1971 г.
R. Schultchik	1977	Векторный анализ объемной точности	Тестовая деталь	Компьютерное программное управление (CNC)
Б.М. Базров	1978	Метод координатных систем с деформируемыми связями	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	–

Автор	Годы публикаций	Методы исследования, анализа и оценки точности станка	Объект оценки. Показатели, параметры, характеристики оценки	Событие: техническое или технологическое / достижимая точность обработки, мкм
А.П. Кузнецов	1979, 1983	Структура, формирование, деформация и искажения геометрических образов	Параметры точности геометрических образов, формируемых станком	Программная коррекция
R. Donaldson	1980	Анализ составляющих погрешностей	Составляющие погрешностей станка	–
W. Knapp	1983, 1998	Статистические методы, методы повышения геометрической точности		–
M. Weck	1984	Методология точности станков		–
Д.Н. Решетов, В.Т. Портман	1986	Вариационный метод расчета поведения станков	Характеристики точности цепи формообразования	–
P.H.J. Schelekens	1986	Моделирование точностного поведения станков	–	Измерительные преобразователи
M. Donmez	1986	Преобразование форм соединительных элементов	–	Миниатюризация компонентов и элементной базы, преобразователей энергии и информации
F. Theuws	1991	Однородные преобразования координатных систем	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	Компьютерное программное управление на базе персональных компьютеров (CNC/PC)
A. Slocum	1992	Однородные преобразования координатных систем	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	–
J.A. Soons	1992	Термо-механический анализ квазистационарного состояния	–	–
V.S.B. Kiridena	1993	Кинематика твердого тела (квазистатическая) и однородные преобразования координатных систем	Метод Ball bar – оценка геометрических параметров отклонений в плоскости перемещений	Изменение формы преобразования электрической энергии в механическое перемещение рабочего органа
H. Soons	1993	Однородные преобразования координатных систем	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	Мехатронные модули движения
T. Moriwaki, N. Sugimura, Y. Miao	1993	Точность движений формообразования на основе однородных преобразований координатных систем	Характеристики точности цепи формообразования	–
J. Chen	1993, 1996	Кинематика твердого тела, нейронные сети	–	–
P.M. Ferreira	1994	Кинематика твердого тела (квазистатическая) и однородные преобразования координатных систем	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	–
H. Nakazawa	1994	Принципы прецизионного проектирования на основе независимых функций и состояний	Изменение выходных параметров точности станка	–
H.A.M. Spann	1995	Однородные преобразования координат. Программный метод компенсации	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	–

Автор	Годы публикаций	Методы исследования, анализа и оценки точности станка	Объект оценки. Показатели, параметры, характеристики оценки	Событие: техническое или технологическое / достижимая точность обработки, мкм
Min S. Hohg, K. Ehmman	1995	Система поверхностных форм	Метод прогнозирования топографии инженерных поверхностей на основе моделей кинематики станков и геометрии режущего инструмента	–
H. Yang	1996	Нейронные сети	–	–
J. Ni	1997	Преобразование координатных систем, авторегрессионный анализ	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	Профильные рельсовые направляющие Ball Cage 1996 г.
I. Inasaki, K. Kishinami, S. Sakamoto, Y. Takeuchi, F. Tanaka	1997	Теория движений формообразования	Положение ТСП – точка центра инструмента	–
H. Yang, Lee	1998	Нейронные сети + система измерения и контроля	–	–
J. Wang	1998	Теория грей-систем	–	–
V. Portman, I. Inasaki, M. Sakakura, M. Iwatate	1998	Образование форм системой станка	Характеристики точности цепи формообразования	–
A.C. Okafor, Y.M. Ertekin	2000	Кинематика твердого тела	–	–/1
Mize, Zeigert	2000	Нейронные сети	–	–
R. Ramesh	2000, 2004	Нейронные и байесовские сети	–	–
C. Wang, O. Svoboda, P. Bach, G. Liotto	2004	Объемные ошибки нетвердого тела при диагональном методе их описания	Лазерный интерферометр. R-тест	–
S. Mekid, J. Jedrjiewski, T.K. Kiong, C. Wang	2009	Анализ составляющих точности. Объемные 3D-ошибки твердого и нетвердого тела	Лазерный трекер. Шагово-диагональный метод	Интеграция информационных систем и систем управления
А.П. Кузнецов	2011	Структурная точность и точность геометрических образов, формируемых станком, метод оценки как функции поля состояний	Деформация геометрических образов, формируемых станком как функции поля состояний	–
S. Ibaraki, W. Knapp	2012	Обобщение методов оценки и контроля параметров точности 3- и 5-координатных станков	Методы контроля: лазерные; Ball bar; R-тест; тестовая деталь	–
G. Fu, J. Fu, Y. Xu, Z. Chen	2014	Экспоненциальная модель интеграции геометрических ошибок станка	Двойной Ball bar	–
Jie Gu, J.S. Agapiou, S. Kurgin	2016	Модель общих смещений из-за погрешностей частей деталей станка и обрабатываемой детали в системах координат КИМ	Деталь и погрешности установки на столе станка	–

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 (shapegeneration) 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 (квазистатическая) и однородные преобразования координатных систем (Kiridena V.S.B., Okafor A.C, Ertekin Y.M.).

В 2000–2016 годах повышение точности станков, в дополнении 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, Zeigert, Ramesh R.), авторегрессионного анализа (Ni J.), грей-систем (Wangetal), статистических методов повышения геометрической точности (Кнарр W.) и др. Продолжаются работы по созданию системных представлений о точности станков и методов их оценки: объемные ошибки нетвердого (non-rigid) тела (Wang C, Svoboda O, Bach P, Liotto G.), объемные 3D-ошибки твердого и нетвердого тела (Mekid S., Jedrjiewski J., Kiong T.K., Wang C.), структурная точность и точность образов, формируемых станком, на основе функций поля состояний (Кузнецов А.П.), экспоненциальная модель интеграции геометрических ошибок станка (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. Agariou and Sheri Kurgin).

В табл. 3 приведены в исторической последовательности основные принципы, используемые в методах оценки показателей точности станков, а также технические и технологические события, приводящие к качественному изменению конструктивно-компоновочных решений самих станков, повышению их точности и функциональных возможностей, что требует соответствующего изменения методов оценки, которые должны быть адекватными уровню качества станка.

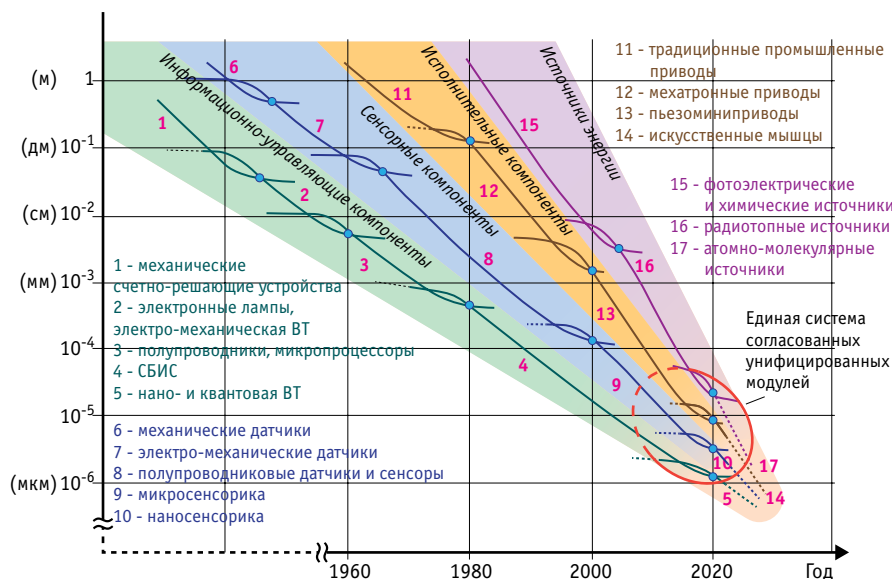


Рис. 11 Развитие компонентов технических систем [25]

На современном этапе таким техническим событием можно считать преимущества мехатронного подхода, что позволяет реализовать синергетический эффект функционального интегрирования (рис. 11) в виде улучшения технических и эксплуатационных параметров устройств, таких как надежность, эффективность, удельное энергопотребление и т.д., а также создавать уникальные компоненты и системы, в целом не реализуемые без использования подобных технологий разработки и изготовления мехатронных модулей движения.

Первый качественный прорыв был сделан в информационно-управляющих компонентах на базе 2D-микроэлектронных технологий. До последнего времени подобные компоненты продолжают лидировать в процессе интеллектуализации и практически уже не лимитируют общий прогресс миниатюризации технических систем в целом. С точки зрения прогресса наиболее важными стали микроминиатюризация сенсорных компонентов на базе 3D-микросистемных технологий, появление микро-электро-механических систем (МЭМС) и микро-опто-электро-механических систем (МОЭМС). Основными компонентами, сдерживающими дальнейшую миниатюризацию технических систем, являются исполнительные (силовые) компоненты. Они до настоящего времени базируются в основном на технических идеях двигателей 19 века. Их будущий прогресс связан с созданием микроминиатюрных исполнительных устройств. Мехатронный подход к проектированию технических систем на основе общесистемных критериев, соответствующих основным требованиям к системе, перспективен в первую очередь для технических систем, когда не предполагается расширение их функционального назначения и номенклатуры.

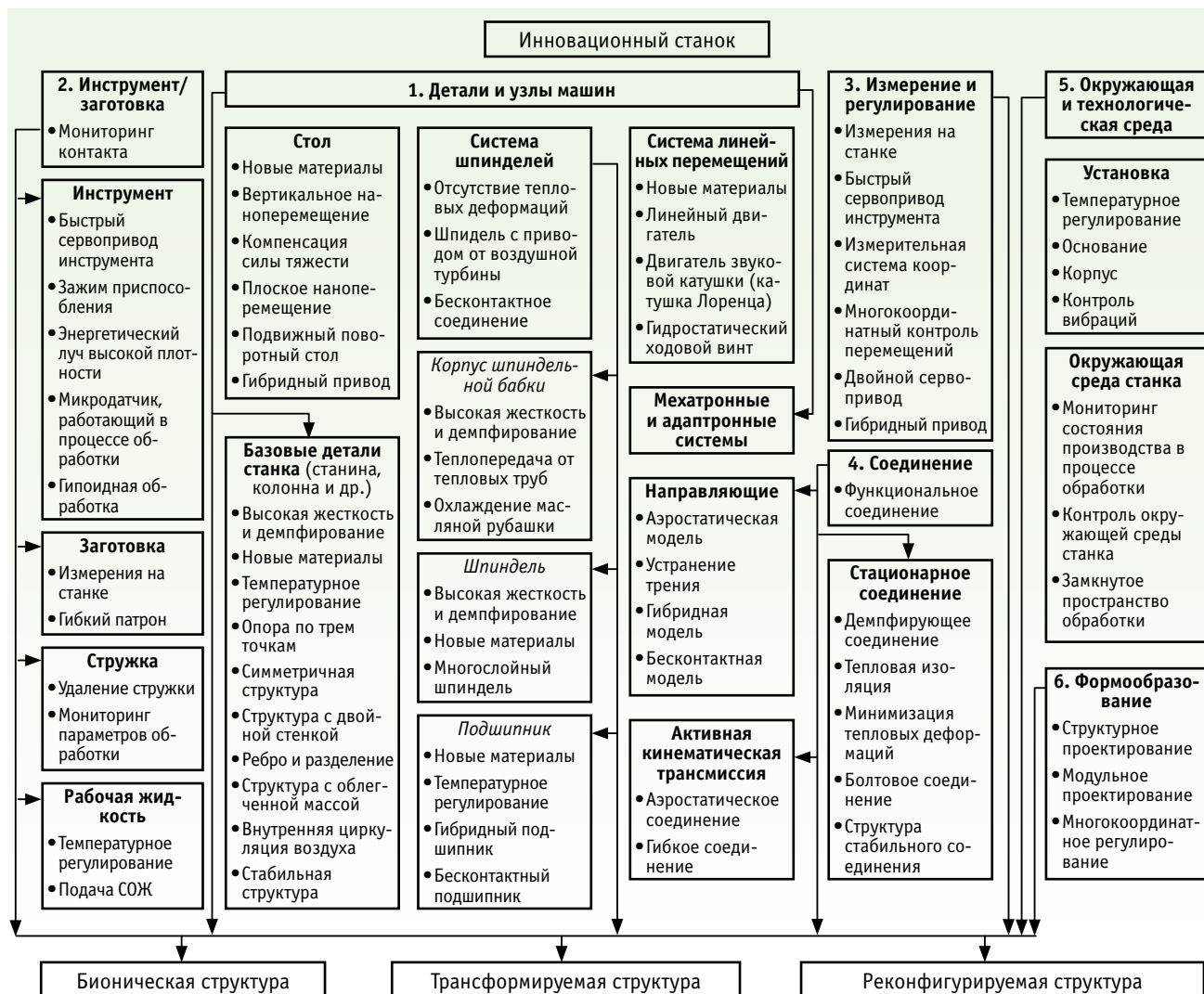


Рис. 12. Принципиальная структура-схема инновационного станка

Системно-мехатронный подход значительно сложнее модульно-мехатронного в силу большей сложности объекта оптимизации. Даже оставаясь нереализуемым, он служит конечной целью или пределом, к которому следует стремиться. Сложность системно-мехатронного подхода логично объясняет тот факт, что мехатроника началась именно с создания однофункциональных компонентов. Следовательно, особенности мехатронного подхода позволяют получать синергетический эффект функционального интегрирования в виде улучшения технических и эксплуатационных параметров устройств, таких как надежность, эффективность, удельное энергопотребление и т.д., а также создавать уникальные компоненты и системы, по существу не реализуемые без подобных технологий разработки и изготовления. На рис. 12 приведена принципиальная структура инновационного станка – станка будущего, структура, свойства и характеристики которого

определяются системой элементов, реализующих иные физические принципы взаимодействия, построение которых основано на одной из трех структур: трансформируемой, реконфигурируемой или бионической. Очевидно, что процесс достижения этой цели будет поэтапным и потребует соответствующих исследований и разработок на основе указанных физических принципов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Соколовский А.П.** Расчеты точности обработки на металлорежущих станках. — М.-Л.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1952. 288 с.
2. **Решетов Д.Н., Портман В.Т.** Точность металлорежущих станков. — М.: Машиностроение, 1986. 336 с.
3. **Lamikiz A., Lopez de Lacalle L.N., Celaya A.** Machine Tools for High Performance Machining. Springer-Verlag London Limited, 2009. 442 p.

4. **Slocum A.H.** Precision machine design, New Jersey. Prentice – Hall Inc, 1992. 750 p.
5. **Бруевич Н.Г., Правоторова Е.А., Сергеев В.И.** Основы теории точности механизмов. – М.: Наука, 1988. 238 с.
6. **Бруевич Н.Г.** О точности механизмов. – М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1941. 52 с.
7. **Бруевич Н.Г., Сергеев В.И.** Основы нелинейной теории точности и надежности устройств. – М.: Наука, 1976. 136 с.
8. **CIRP Encyclopedia of Production Engineering.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 1340 p.
9. **Dornfeld D., Lee D-E.** Precision Manufacturing. Springer Science+Business Media LLC, 2008. 775 p.
10. **Venkatesh V.C., Izman S.** Precision engineering. Mc Grow Hill, 2007.
11. **Mekid S.** Introduction to precision machine design and error assessment. CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. 330 p.
12. **Кузнецов А.П.** Структуры процессов и оборудования для обработки резанием. Ч. 2. Структуры технологических процессов и их классификация // Вестник машиностроения. 2015. № 3. С. 65–76.
12. **Кузнецов А.П., Качева О.Н.** Современные системы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. – М.: НИИмаш, 1984. 72 с.
14. **Кузнецов А.П.** Методы оценки и контроля качества металлорежущих станков. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. 68 с.
15. **Кузнецов А.П.** Тепловое поведение и точность металлорежущих станков. – М.: Янус-К, 2011. 256 с.
16. **Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitte R., Delbressine F.** Geometric error measurement and compensation of machines – An update. CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2008. V. 57. P. 660–675.
17. **Taniguchi N.** Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 1983. V. 32. Iss. 2. P. 573–582.
18. **Smith S.T., Chetwynd D.G.** Foundations of Ultraprecision Mechanism Design. Taylor & Francis Group, 2005. 320 p.
19. **Jackson M.J.** Microfabrication and nanomanufacturing. Taylor & Francis Group, 2006. 388 p.
20. **Jackson M.J., Morrell J.** Machining with nanomaterials. – Springer Science + Business Media, LLC, 2009. 368 p.
21. **Кузнецов А.П.** Структуры процессов и оборудования для обработки резанием. Ч. 3. Структуры процессов для обработки резанием // Вестник машиностроения. 2015. № 3. С. 76–87.
22. **Bernd X. Weis.** From idea to innovation. A Handbook for Inventors,
23. **Decision Makers and Organizations.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. 262 p.
24. **Кузнецов А.П., Косов М.Г.** Структурная точность металлорежущих станков // СТИН. 2012. № 2. С. 4–12.
25. **Кузнецов А.П., Косов М.Г.** Структурная точность металлорежущих станков // СТИН. 2012. № 5. С. 2–7.
26. Концепция мехатронных технологий и микророботостроения / **В.А. Лопота, Е.И. Юревич, А.С. Кондратьев, В.В. Кириченко** http://www.energiya.ru/ru/news/news-2011/public_07-21.pdf.
27. A general approach for error modeling of machine tools/ **W. Tian, W. Gao, D. Zhang, T. Huang** // International Journal of Machine Tools & Manufacture. Elsevier Ltd. 2014. V. 79. P. 17–23.
28. An identification method for key geometric errors of machine tool based on matrix differential and experimental test. Proc IMechE Part C/ **D. Li, P. Feng, J. Zang, D. Yu, Z. Wu.** // J. Mechanical Engineering Science 0(0). 2014. P. 1–15.
29. An Analysis Methodology for Stochastic Characteristic of Volumetric Error in Multiaxial CNC Machine Tool/ **Q. Cheng, C. Wu, P. Gu et al.** // Mathematical Problems in Engineering. 2013. Article ID 863283, 12 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/863283>.
30. **Stephenson David A.** Agapiou John S. Metal cutting theory and practice. Third edition. CRC Press. London – N.Y.: Taylor & Francis Group, 2016. 932 p.
31. **Кузнецов А.П.** Структуры процессов и оборудования обработки резанием. Ч. 4. Структуры оборудования обработки резанием // Вестник машиностроения. 2015. № 5. С. 63–77.
32. **Kuznetsov A.P.** Evolution of the methods of estimation accuracy of machine tools and its change trend. Part 1: The evolution of the concept of accuracy and its physical model. Russian Engineering Research, 2017. Vol. 37. No. 3. P. 171–179.
33. **Бушуев В.В., Кузнецов А.П., Сабиров Ф.С., Хомяков В.С., Молодцов В.В.** Проблемы точности и эффективности современных металлорежущих станков // СТИН. 2016. № 2. С. 6–16.
34. **Кузнецов А.П.** Вероятностные методы оценки и управления точностью надежностью металлорежущих станков при тепловых воздействиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 72–81.
35. **Бушуев В.В., Кузнецов А.П., Сабиров Ф.С., Хомяков В.С., Молодцов В.В.** Состояние и направления развитие научных исследований в станкостроении // СТИН. 2015. № 11. С. 12–20.

КУЗНЕЦОВ Александр Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры станков МГТУ «СТАНКИН» / МГТУ им. Н.Э. Баумана, директор по науке, инжинирингу и инновационному развитию АО «Станкопром»