



ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



10/2013

УДК 621.9.06-529

Ю. В. МАКСИМОВ, д-р техн. наук (Университет машиностроения МАМИ),
А. А. БЕКАЕВ, канд. техн. наук (Университет машиностроения),
Д. А. ГАЛАКТИОНОВ (компания Michelin), А. Ю. ВТОРОВА
(Университет машиностроения МАМИ), e-mail: bekaev@list.ru

Обеспечение точности позиционирования рабочих органов технологического оборудования

Разработана функциональная математическая модель обрабатывающего центра, учитывающая погрешности станка. На ее основе предложен способ программной коррекции исполнительных движений станка с ЧПУ, позволяющий повысить точность обработки в реальном режиме времени.

Ключевые слова: механическая обработка, станок с ЧПУ, точность, математическая модель, рабочий орган, коррекция.

The functional mathematical model of a machining center, taking into account machine inaccuracies, is developed. On its base the method of software correction of actuating movements of an NC machine tool, that allows increasing processing accuracy in real-time mode, is suggested.

Keywords: machining, NC machine tool, accuracy, mathematical model, movable operating element, correction.

В современных условиях к точности обработки на металлорежущих станках предъявляются очень высокие требования. Так, допуски на некоторые получаемые размеры могут составлять десятые доли микрометра, а допуски на точность форм и взаимного положения поверхностей — сотые доли микрометра. Следовательно, к точности функционирования металлорежущего станка предъявляются жесткие требования [1]. При этом следует учитывать, что при наличии различных возмущающих воздействий на оборудование его точность нарушается, кроме того, при длительной эксплуатации станка ухудшаются его выходные параметры. Однако использование

высокоточного оборудования не всегда оправдано, поэтому актуален поиск оптимальных решений в обеспечении точности обработки.

Широкое использование станков с ЧПУ обуславливает возможность повышения точности выходных параметров станка путем программной коррекции исполнительных движений, при котором расчетами и экспериментально определяют зависимости погрешностей оборудования от выходных параметров станка, т. е. используют математическую модель, которая сохраняется в памяти системы управления станка. Причем эффективность такого метода будет тем выше, чем большее количество погрешно-

стей станка будет учтено. При этом объектом управления являются функции станка, а математическая модель отображает все существующие взаимосвязи отдельных звеньев станка и их взаимодействия с внешней средой.

При построении модели применяют теорию управления сложными объектами, согласно которой по единым принципам создаются системы управления для различных станков, особенности конкретных станков учитываются при разработке способов получения информации об их функционировании и вводе управляющих воздействий [2–5].

Применение теории управления позволяет в общем случае представить технологическую систему (ТС), в которой объектом управления является станок, а управляющим устройством — система ЧПУ (рис. 1). На рис. 2 представлена блок-схема металлорежущего станка с ЧПУ, где совокупность выходных параметров ТС обозначается вектором состояния: $X(t) = [Y_1(t), \dots, Y_m(t)]$, составляющие которого представляют собой размерные параметры обрабатываемого изделия.

Воздействие ЧПУ на металлорежущий станок выражается совокупностью параметров, которые обозначаются вектором управляющих воздействий: $U(t) = [U_1(t), \dots, U_k(t)]$. На составляющие векторов состояния и управляющих воздействий существенное влияние оказывают различные возмущающие воздействия, на ТС: $X(t) = [X_1(t), \dots, X_k(t)]$, к ним можно отнести температурное поле ТС, массу заготовки,

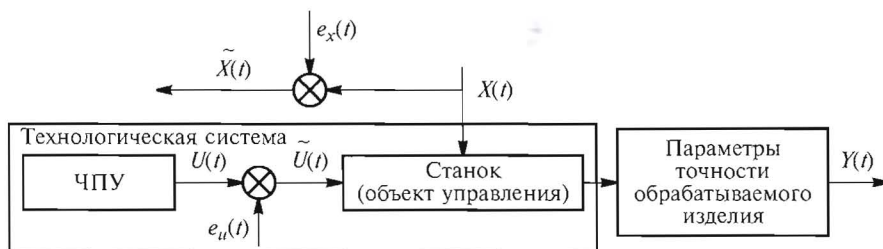


Рис. 1. Блок-схема технологической системы

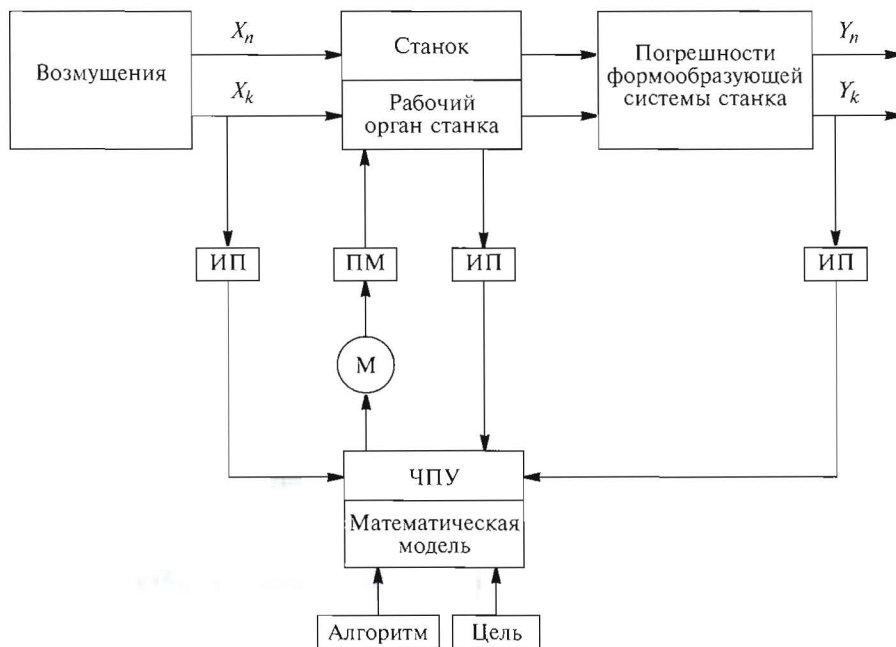


Рис. 2. Блок-схема системы управления металлорежущего станка с ЧПУ:

М — двигатель, ИП — измерительные преобразователи; ПМ — перемещаемый (рабочий) механизм

силу резания, износ инструмента и т. д.

Некоторые составляющие векторов состояния и возмущающих воздействий (назовем их контролируемыми и обозначим X_k и Y_k) можно определить (измерить) в процессе эксплуатации станка (см. рис. 2), составляющие, которые нельзя измерить, назовем неконтролируемыми (X_n и Y_n) [6, 7]. Для измерения X_k и Y_k можно использовать различные измерительные преобразователи (ИП), при этом погрешности измерения могут быть значительными. Так, например, нельзя получить полного представления о темпе-

ратурном поле ТС по показаниям ИП, определяющих температуру в нескольких точках системы. На работу системы управления кроме погрешности измерения векторов X и Y могут существенно влиять погрешности в передаче управляющих воздействий от устройства ЧПУ к исполнительным органам станка (рис. 3).

Таким образом, при наличии погрешности $e_x(t)$ измерения контролируемых возмущений в устройство ЧПУ приходят сигналы $\tilde{X}(t)$ (см. рис. 1), а при наличии погрешностей $e_u(t)$ передачи управляющих воздействий на ра-

бочие органы поступает сигнал $U(t)$. Особенностью возмущающих воздействий является то, что их изменение носит случайный (непредсказуемый) характер, кроме того, они изменяются с различной скоростью.

Невозможно учесть и все составляющие вектора возмущающих воздействий, поэтому приходится рассматривать только основные, определяющие входные переменные, остальные отнесем к неконтролируемым факторам, что увеличит дисперсию вектора состояния (уровень шума ТС). Наличие различных неконтролируемых, но существенных факторов придает металлорежущему станку как объекту управления стохастический характер.

Обобщив вышеизложенное, будем считать, что металлорежущий станок как объект управления — многомерный много-связный нелинейный с непрерывно изменяющимися случайными контролируемыми воздействиями [8, 9], при этом характеризуется уровнем шума, что обусловлено погрешностями измерения, начальными погрешностями станка и наличием неконтролируемых возмущающих воздействий. Данный объект [10] можно представить как

$$Y(t) = F[X(t), U(t), \beta] + E_Y(t), \quad (1)$$

где F — неизвестная вектор-функция; β — вектор параметров модели; E_Y — приведенный аддитивный уровень шума, обусловленный воздействием неконтролируемых факторов.

В настоящее время наиболее точным методом, применяемым при моделировании работы станков с ЧПУ, является матричный метод [11], в котором машины и механизмы представляются в виде структурных кинематических цепей. Задаются неподвижная система координат, как правило, связанная с основанием, и сис-

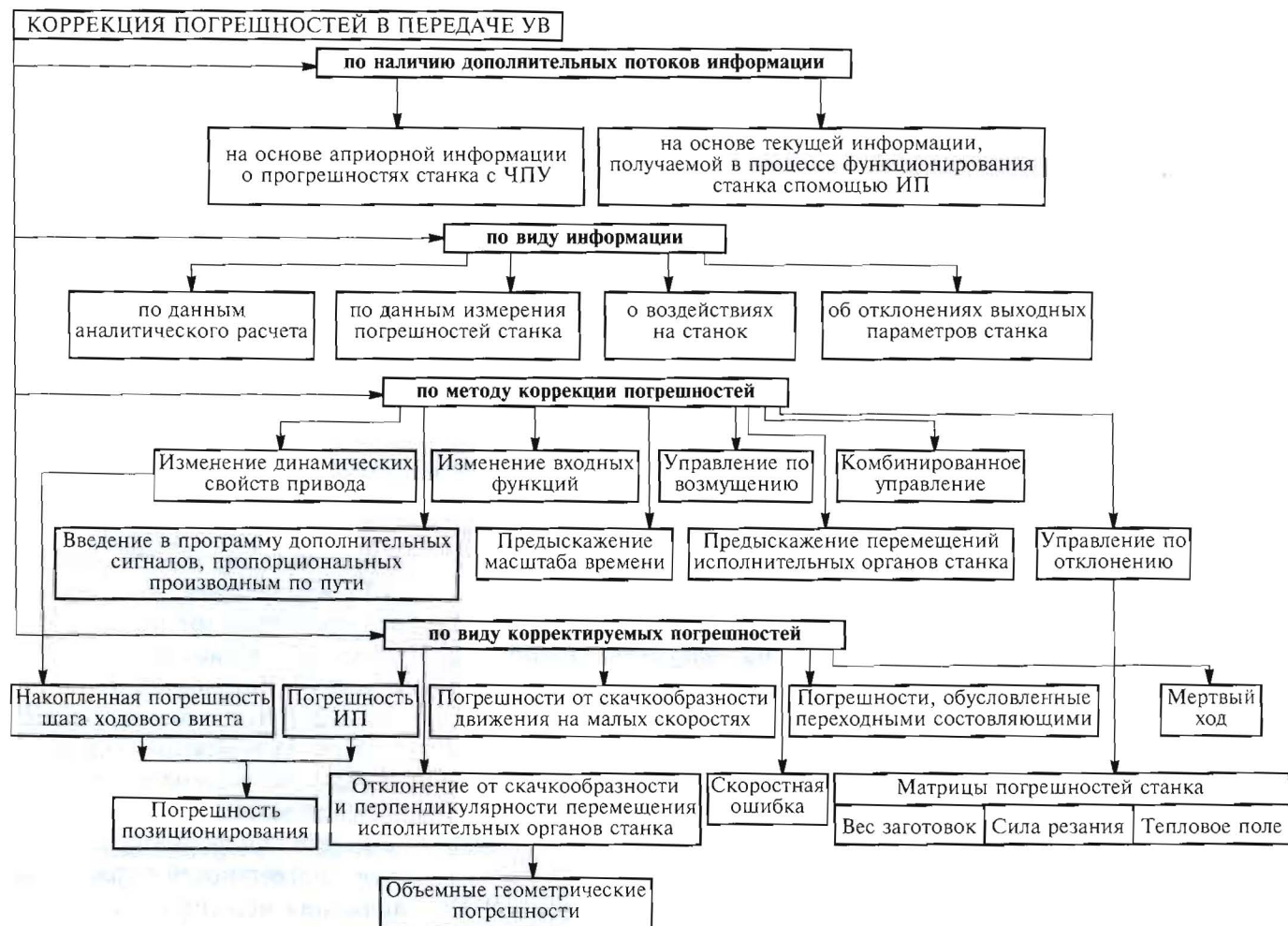


Рис. 3. Схема программного метода коррекции погрешностей станка с ЧПУ

темы координат, связанные со звеньями этих цепей. Если для каждого звена выбрать систему координат и сориентировать их по определенным правилам, то относительное положение звеньев можно определить переходными матрицами — матрицами перехода от одной системы координат к другой.

В матричном методе используют в основном вещественные $(4 \times 4, 6 \times 6)$ и дуальные $(2 \times 2, 3 \times 3)$ переходные матрицы. Вид матрицы зависит от типа решаемой задачи. Обоснования применения матричного метода при моделировании работы металлорежущих станков даны в работах [11 и 12], а исследования вещественных матриц 4×4 приведены в работах [13—15].

В работах [16 и 17] приведены основные сведения по теории винтов и изложен матричный метод с использованием дуальных матриц. Данная теория базируется на алгебре дуальных чисел, состоящих из пары действительных чисел $(a \text{ и } a^\circ)$ и представленных как $\hat{a} = a + wa^\circ$, где a — главная часть; a° — моментная часть; $w^2 = 0$. Дуальную матрицу $\hat{A}$ можно записать как $\hat{A} = A + wA^\circ$, где главная часть A — ортогональная матрица, характеризующая ориентацию двух произвольно выбранных ортогональных систем координат, а моментная часть $A^\circ = PA$, где P — кососимметричная матрица, состоящая из компонентов радиус-вектора $P = (p_x, p_y, p_z)$, определяющего

положение этих систем координат. Применение этих матриц позволяет представить в краткой форме преобразование системы координат двух смежных звеньев.

Другая форма матричного подхода к определению положения звеньев механизма состоит в использовании вещественных винтовых матриц (6×6) . Здесь используется тот же обход звеньев, как и при применении матриц 4×4 , но в качестве операторов преобразования применяются винтовые аффиноры [18].

Значительный интерес представляют исследования работы металлорежущих станков с помощью переходных матриц 4×4 , ориентированных на программное вычисление [11], в которых имеется возможность исследо-

вать многозвенные механизмы и решать основные задачи анализа.

Известно, что вид переходных матриц зависит от способа задания системы координат, при этом с каждой кинематической парой связывают две (первый способ), или одну (второй способ) систему координат.

Первый способ применяют, как правило, для замкнутых структурных цепей. В этом случае полагают, что форма звена остается неизменной, т. е. относительное расположение систем координат звена постоянно. Переменным является относительное расположение звеньев кинематической пары. Исходя из этого, можно составить матрицы перехода от одной системы координат к другой (системы заданы на одном звене), которые являются постоянными и характеризуют "форму" звена [11].

Во втором способе, применяемом для открытых структурных цепей, с каждым звеном связывают одну систему координат. При этом можно задавать ее по способу Денавит—Хартенберга [19], суть которого состоит в определении относительных положений звеньев станка. Звенья нумеруют цифрами 0, 1, ..., n начиная с основания станка (или технологических баз детали). Конечное звено этой цепи — режущий инструмент, ему присваивается номер n . Номера $i = 1, 2, \dots, n$ присваивают кинематической паре, образованной $(i - 1)$ -м и i -м звеньями, и связывают с каждым i -м звеном станка ортогональную систему координат.

Суть предлагаемого метода программной коррекции исполнительных движений станка с ЧПУ состоит в том, что любые его погрешности — начальные погрешности или погрешности в результате силовых и тепловых деформаций, можно аппроксимировать матричной математической моделью, которая строится

на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей (пространственное поле, поля сил тяжести P , сил резания F и температур T). При построении матричной математической модели в рассматриваемом поле фиксируется конечное число узловых точек, для которых экспериментально определяют значения погрешностей. При этом для каждой точки вычисляется математическое ожидание, характеризующее систематическую составляющую погрешности, и среднее квадратичное отклонение, характеризующее случайную составляющую погрешности.

Таким образом, поле разбивается на элементы (например, трехмерное пространственное поле с элементами типа параллелепипед), а информация о величине систематической составляющей погрешности представляется в цифровом виде с дискретностью отработки привода подач и вводится в память системы ЧПУ (случайная составляющая погрешности, возникающая, например, в результате трения в направляющих, не может быть учтена при

коррекции). Суммарную погрешность в узловых точках можно получить, определяя отдельные составляющие этой погрешности в базовой системе координат и математически комбинируя их. Все это позволяет повысить точность позиционирования рабочих органов станка, а следовательно, и точность обработки.

Данная методика программной коррекции исполнительных движений станка с ЧПУ была использована при исследованиях повышения точности обработки на трехкоординатном сверлильно-фрезерно-расточном обрабатывающем центре FineTech SMV-450-H3 (рис. 4 и 5) в рамках госконтрактов по ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг." и госзадания НИР по ЕЗН. Результатом стала функциональная математическая модель обрабатывающего центра (в матричной форме), учитывающая погрешности траекторий движения исполнительных органов, а также погрешности относительного положения узлов, несущих инструмент и заготовку; предложена статистическая оцен-

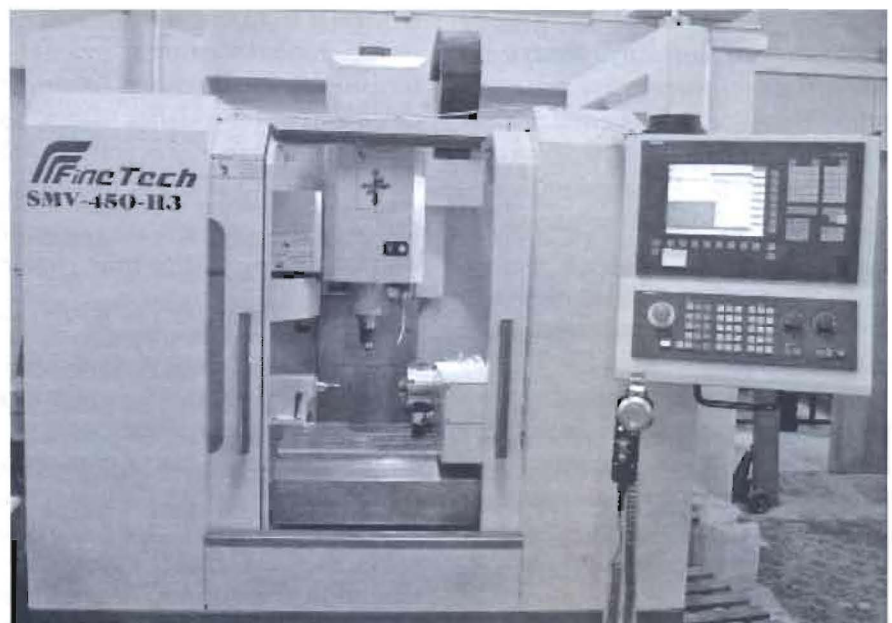


Рис. 4. Обрабатывающий центр FineTech SMV-450-H3

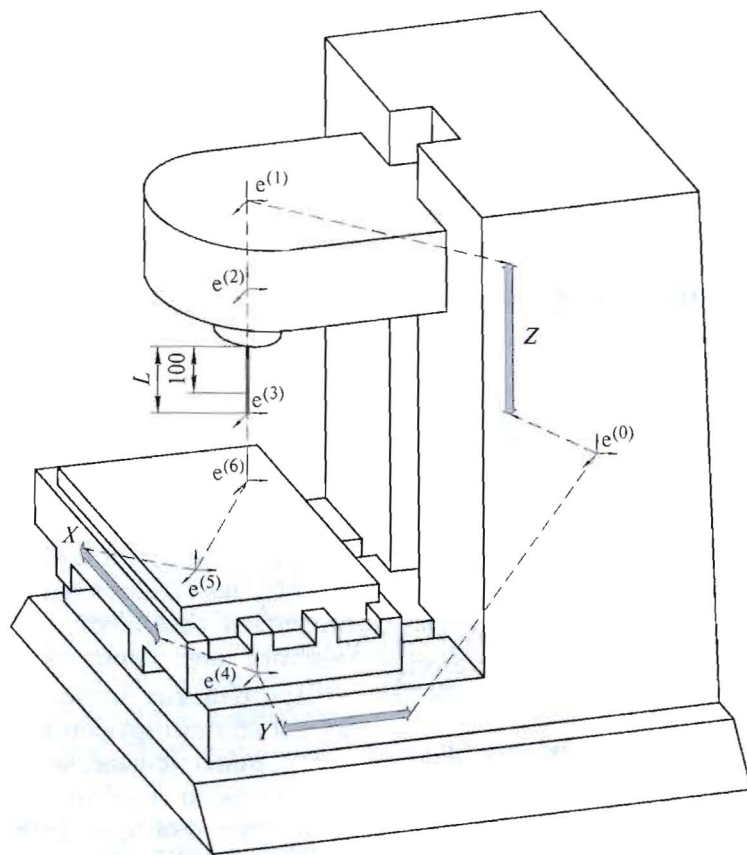


Рис. 5. Схема структурных цепей сверлильно-фрезерно-расточного обрабатывающего центра FineTech SMV-450-H3

ка точности разработанной модели, с помощью измерительного комплекса Ballbar проведены экспериментальные исследования на подтверждение ее адекватности; разработан алгоритм программно-математической коррекции исполнительных движений рабочих органов станка с ЧПУ, позволяющий повысить точность позиционирования и уменьшить погрешности обработки, вызываемые отклонением от прямолинейности траекторий движения рабочих органов станка.

Предлагаемый способ повышения точности обработки на станке с ЧПУ представляется наиболее эффективным (из ранее известных), так как позволяет выполнять точную корректировку движений исполнительных органов станка в реальном режиме времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Программное управление станками / В. Л. Сосонкин, О. П. Михайлов, Ю. А. Павлов и др.; под ред. В. Л. Сосонкина. М.: Машиностроение, 1981. 398 с.
2. Беляков Б. Ю. Автоматизация обеспечения оценки точности технологического оборудования при статически неопределимом базировании: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / МГТУ "Станкин". М., 2003. 26 с.
3. Калиберда Е. А. Моделирование формообразования сложных поверхностей при многокоординатной обработке на станках с ЧПУ / Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ МАМИ, 2004. 200 с.
4. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Пер. с англ. Л.: Судостроение. 1980, 384 с.
5. Математическое прогнозирование качества обрабатываемой поверхности детали при ударной нагрузке в начале процесса прошива-

ния / А. А. Бекаев, Ю. В. Максимов, В. А. Михайлов и др. // Вестник машиностроения. 2011. № 5. С. 17–20.

6. Рубашкин И. Б. Адаптивные системы взаимосвязанного управления электроприводами. Л.: Энергия, 1975. 160 с.

7. Рубашкин И. Б. Оптимизация металлообработки при прямом цифровом управлении станками. Л.: Машиностроение, 1980. 144 с.

8. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. Н. Жидков, Г. М. Кобельков. М.: Наука, 1987. 600 с.

9. Бекаев А. А. Повышение геометрических параметров качества обрабатываемой поверхности детали в процессе протягивания (прошивания) на основе совершенствования динамических характеристик привода оборудования / Дис. ... канд. техн. наук / М.: МГТУ МАМИ, 2006. 274 с.

10. Ивановский С. П. Повышение точности программного управления технологическим оборудованием на основе построения и идентификации кинематических моделей / Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ МАМИ, 2004. 110 с.

11. Кинематика, динамика и точность механизмов: Справочник / Под ред. Г. В. Крейнина. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.

12. Базров Б. М. Расчеты точности машин на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.

13. Базров Б. М. Технологические основы проектирования самоподстраивающихся станков. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.

14. Портман В. Т. Суммирование погрешностей при аналитическом расчете точности станка // Станки и инструмент. 1980. № 1. С. 6–8.

15. Портман В. Т. Матричный метод расчета точности металлорежущих станков. М.: ЭНИМС, 1987. 24 с.

16. Решетов Д. Н., Портман В. Т. Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. 356 с.

17. Диментберг Ф. М. Винтовое исчисление и его приложения в механике. М.: Наука, 1965. 199 с.

18. Диментберг Ф. М. Метод винтов в прикладной механике. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.

19. Denavit J., Hartenberg R. S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices // Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, V. 77, 1955. P. 215–221.