

Перспективы повышения точности прецизионных многокоординатных машин с ЧПУ методами цифровой коррекции

Н. А. Серков, О. В. Пась

Рассмотрены перспективы повышения точности многокоординатных машин с ЧПУ методами цифровой коррекции. Оценены перспективы встраивания систем калибровки 6D в несущую систему прецизионных многокоординатных машин с ЧПУ, что позволит реализовать всестороннюю коррекцию в реальном масштабе времени первичных отклонений, возникающих при движении подвижных узлов машины, включая их «случайную» составляющую.

Ключевые слова:

ЧПУ, высокоточное производство, методы цифровой коррекции, измерения и калибровка 6D

УДК 006.91 | ВАК 2.2.10

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.29.4.42.49

Введение

Точность изготовления деталей и узлов машины во многом определяет эффективность ее работы во время эксплуатации. Например, повышение точности обработки лопатки – переход с допуска на контур лопатки компрессора авиационного двигателя с 60 до 12 мкм, достигнутое фирмой Rolls-Royce Limited за 23 года упорной работы, – позволило повысить КПД компрессора авиационного двигателя на 15% [1].

Высокоточное производство в настоящее время становится все более значимым [2], и многие изделия современного производства полностью зависят от одного или нескольких компонентов, изготавливаемых с допусками и размерами в субмикронном диапазоне.

Точностные параметры машины во многом определяются точностными свойствами технологического оборудования, на котором они изготавливаются, и, в частности, точностью движения исполнительных органов. Отклонения движения рабочих органов технологического оборудования от заданной траектории имеют случайную и систематическую

(функциональную) составляющие. Методы уменьшения случайной и функциональной составляющих отклонения от заданной траектории движения рабочих органов технологического оборудования существенно различаются [3].

Совершенствование конструкции несущей системы (НС) машины и технологии ее изготовления, как правило, применяется для уменьшения случайной составляющей, а использование цифровой коррекции в процессах управления многокоординатной машины с ЧПУ все в большем объеме используется для уменьшения функциональной составляющей.

Успехи в указанных направлениях определяются научными и технологическими достижениями в различных инженерных дисциплинах, таких как:

- конструкционное материаловедение;
- машиноведение;
- конструирование машин;
- технология машиностроения и др.

В частности, развитие средств измерения и средств вычислительной техники непосредственно влияют

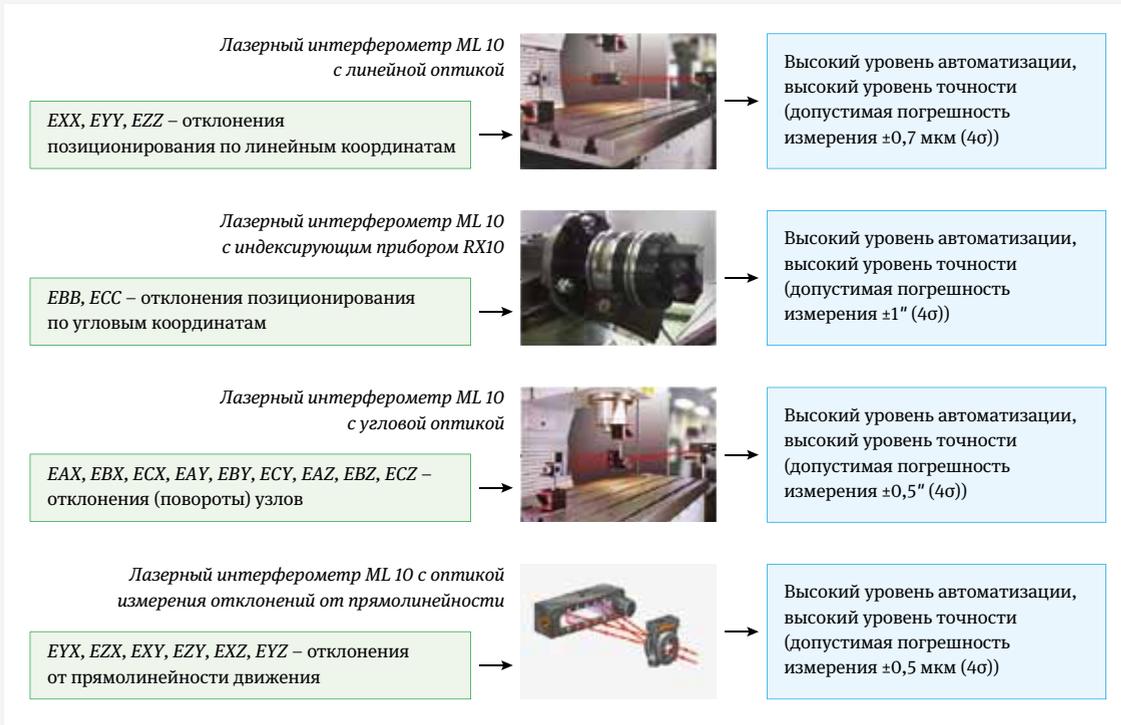


Рис. 1. Средства измерения первичных отклонений станка с ЧПУ

на совершенствование и степень использования методов цифровой коррекции для повышения точности функционирования прецизионных многокоординатных машин с ЧПУ.

Ниже рассмотрены переход от калибровки машины на стадии ее сборки к встраиванию измерительных средств в конструкцию станка и использование методов калибровки для улучшения повышения точности отработки заданной траектории движения рабочих органов.

Успехи калибровки машин с ЧПУ

До недавнего времени наиболее прогрессивным и распространенным средством калибровки станков с ЧПУ был лазерный интерферометр, оснащенный различной измерительной оптикой, например лазерный интерферометр Renishaw ML 10 (Великобритания).

На рис. 1 представлены фрагменты измерений некоторых первичных отклонений станка с использованием лазерного интерферометра ML 10 [3].

К настоящему времени в мировой практике машиностроения созданы новые средства измерения первичных отклонений движения основных узлов технологического оборудования с ЧПУ, которые получают широкое применение в промышленности. На рис. 2 приведены характерные представители этих средств измерения-калибровки узлов, реализующих линейные перемещения, а именно: прецизионные лазерные измерительные средства, позволяющие измерять отклонения движения по «прямой» одновременно по шести координатам (3 линейные – позиционирование,

прямолинейность в двух плоскостях, 3 угловые – повороты вокруг трех декартовых координат) с точностью на уровне 1 мкм и 1 угл. с.

На рис. 3 представлен комплект средств измерения от компании Lion Precision [4], предназначенный для оценки точности прецизионных шпинделей, который



Рис. 2. Лазерные калибраторы 6D для технологического оборудования с ЧПУ



Рис. 3. Измерительное устройство 5D компании Lion Precision

может быть использован для калибровки 5D прецизионных поворотных столов.

Следует отметить, что за исключением устройства, приведенного на рис. 3, для поворотных столов и головок в настоящее время еще не созданы средства измерения 6D, как для узлов, реализующих линейные перемещения (рис. 2). Но интенсивность проведения исследовательских работ, направленных на развитие методов измерения и калибровки 6D-узлов поворота [5–6] нарастает.

Компания Hexagon AICON ETALON GmbH (Germany) [7] создала калибратор (рис. 4 а), позволяющий измерять интегральные отклонения позиционирования исполнительных органов машины в координатах рабочего пространства (рис. 4 б) в виде «облака» отклонений $d_i \{x_i, y_i, z_i\}$ (рис. 4 в).

Информация об интегральных отклонениях используется для коррекции по методу «корректирующей матрицы». Этот метод широко используется в системах управления

КИМ и частично в системах ЧПУ (Sinumerik 840D SL) через файлы «таблица объемной коррекции».

Применение современных калибровочных средств измерения и методов коррекции (метода коррекции первичных отклонений квазипараллельными процессами, метода коррекции по измеренным интегральным отклонениям – метод «корректирующей матрицы») в сочетании с современными конструкторскими и технологическими решениями позволило достигнуть точности отработки траектории в пространстве на современных многоцелевых станках с ЧПУ [5, 8, 9] до уровня нескольких микрон. При этом следует отметить, что допуск на случайную составляющую отклонения контролируемого (нормируемого) параметра, как правило, равен половине допуска на общее отклонение параметра точности движения узла станка.

Дальнейшее повышение точности многокоординатной обработки

Дальнейшее повышение точности отработки изделий на многокоординатных технологических машинах с ЧПУ при рассмотренном подходе становится затруднительным. Возможно поэтому в настоящее время начинают интенсивно вестись работы по созданию компактных средств измерения отклонений 6D (3 линейных и 3 угловых), которые могут быть встроены в конструкцию прецизионного технологического многокоординатного оборудования с ЧПУ (в следящие привода каждой управляемой координаты). Пока только для узлов, обеспечивающих движение по линейным координатам [10].

Встраивание измерительного средства нанометрического уровня типа 6D в конструкцию технологического оборудования с ЧПУ дает возможность уменьшить как случайную, так и функциональную составляющую общего отклонения нормируемого параметра точности движения узла машины. При этом, помимо создания встраиваемых средств измерения для узлов, обеспечивающих

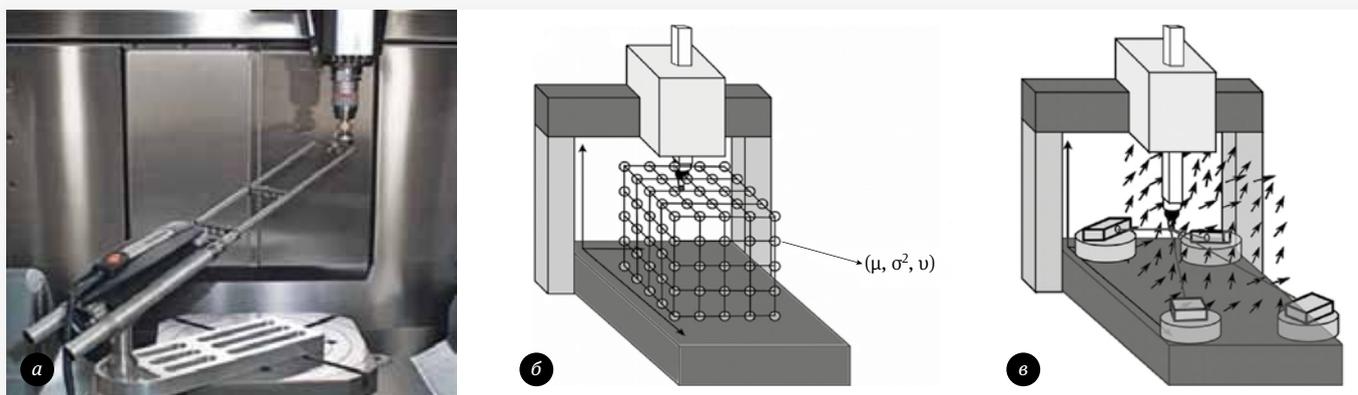


Рис. 4. Прецизионный лазерный калибратор для измерения интегральных отклонений («облако» – поле отклонений $d_i \{x_i, y_i, z_i\}$)

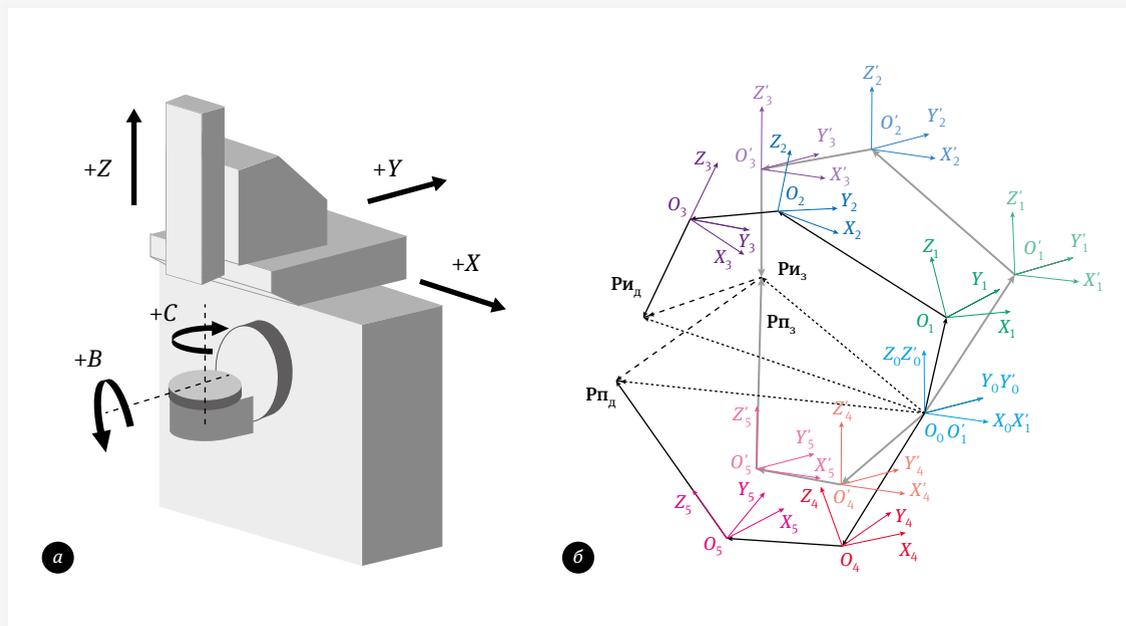


Рис. 5. Схема образования интегрального отклонения $R_{ид}$

движение по линейным и поворотным осям, необходимо решить следующую задачу управления.

Задача включения сигнала измерения отклонения позиционирования в контур управления приводом управляемой координаты хорошо изучена и решена как для линейных, так и поворотных осей. Значительно сложнее компенсировать другие отклонения, такие как, например:

- отклонения от прямолинейности движения в двух плоскостях;
- линейные отклонения, вызванные углами поворота вокруг осей X, Y, Z, например, при линейном движении узла и др.

Для компенсации этих отклонений необходимо применить в реальном масштабе времени метод коррекции с использованием векторной модели образования интегрального отклонения – вектора $R_{ид}$ (рис. 5 б) [3] положения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали. На рис. 5 представлена схема перехода из системы координат станины в систему координат шпиндельной бабки и в систему координат планшайбы для «действительного» (без индекса ') и «идеального» (с индексом ') станка, применительно для 5-координатного станка мод. МС 300 (рис. 5 а). В этом случае, вычисляемый в реальном масштабе времени вектор отклонения $R_{ид}$ раскладывается на три линейные компоненты, которые обрабатываются имеющимися поворотными приводами. Интегральные угловые отклонения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали получают простым алгебраическим сложением отклонений углов поворота вокруг осей X, Y, Z и обрабатываются поворотными приводами.

Развитие методов цифровой коррекции в станках с ЧПУ

Основной предпосылкой применения цифровой коррекции (калибровки многокоординатных машин с ЧПУ) является обеспечение высокой повторяемости отклонений воспроизведения траектории движения исполнительного органа (ИО) многокоординатной машины с ЧПУ.

Современные многоцелевые 5-координатные станки с ЧПУ обладают этим свойством благодаря:

- применению в конструкциях направляющих качения с предварительным натягом, современных систем приводов высокой статической и динамической жесткости и других конструктивных мероприятий;
- обеспечению высокой температурной стабильности, достигаемой как побочный эффект применения холодильника для приводов (direct drive) (в дальнейшем, возможно, как отдельная цель);
- обеспечению высокой износостойкости станка, достигаемой оптимизацией конструкции, материалов и методов обработки ответственных деталей станка.

Основным методом цифровой коррекции в станках с ЧПУ в настоящее время является метод коррекции первичных отклонений (14 из 41) квазипараллельными вычислительными процессами. Способ реализован в современных системах ЧПУ, например Sinumerik 840 D.

Развитие средств вычислительной техники идет ускоренными темпами, и в недалеком будущем вероятно откроется возможность решить задачу метода полной коррекции первичных отклонений в реальном масштабе времени в цикле интерполирования <2 мс, которую еще нельзя решить в настоящее время [11].

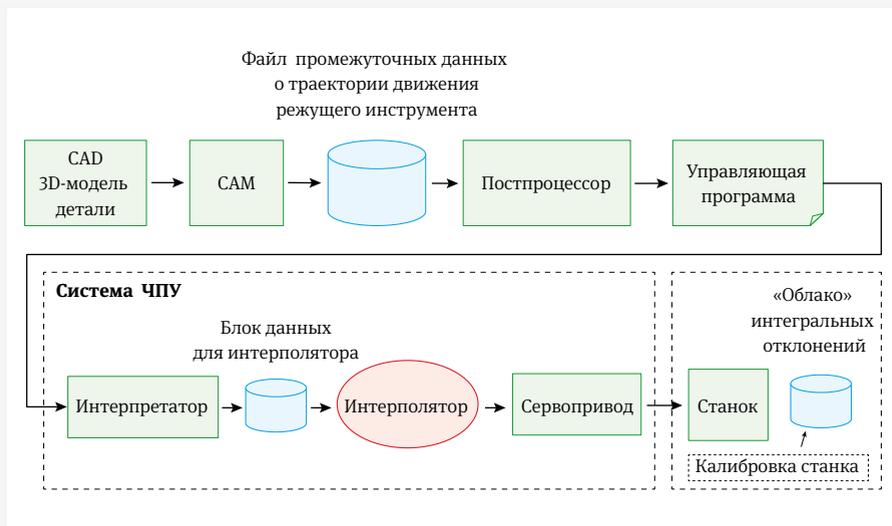


Рис. 6. Блок-схема потоков информации при реализации движения по программной траектории

Развитие метода полной коррекции первичных отклонений

На рис. 6 показаны потоки информации (данных) при реализации числового программного управления на примере процесса обработки детали на станке с ЧПУ [12]. На выходе вычислительного модуля САМ-системы генерируется файл промежуточных данных, поступающий в постпроцессор. В нем, на основе информации о кинематике станка и структуре системы ЧПУ, решается обратная задача кинематики и рассчитываются

траектория и режимы (скорости и ускорения) движения исполнительных механизмов станка. Далее генерируется текст управляющей программы с синтаксисом для данной стойки системы ЧПУ.

При поступлении управляющей программы в систему ЧПУ интерпретатор поблочно выгружает кадры из нее во внутреннюю память. Далее интерполятор загружает полученные кадры из буфера и в режиме реального времени рассчитывает величины перемещений по отдельным координатам, которые одновременно в реальном масштабе времени обрабатываются приводами станка в цикле «управление по положению».

Из представленного рассмотрения протекания потоков информации от системы CAD до движения ИО станка с ЧПУ можно выделить следующие

способы внесения корректирующих поправок:

- Способ, в котором на каждом шаге интерполирования осуществляется расчет интегральных отклонений движения ИО станка и проводится внесение коррекции (dx, dy, dz, da, db) в привод каждой управляемой координаты в реальном масштабе времени. Этот способ пока не реализуется из-за необходимости иметь слишком большие вычислительные средства в системе ЧПУ.

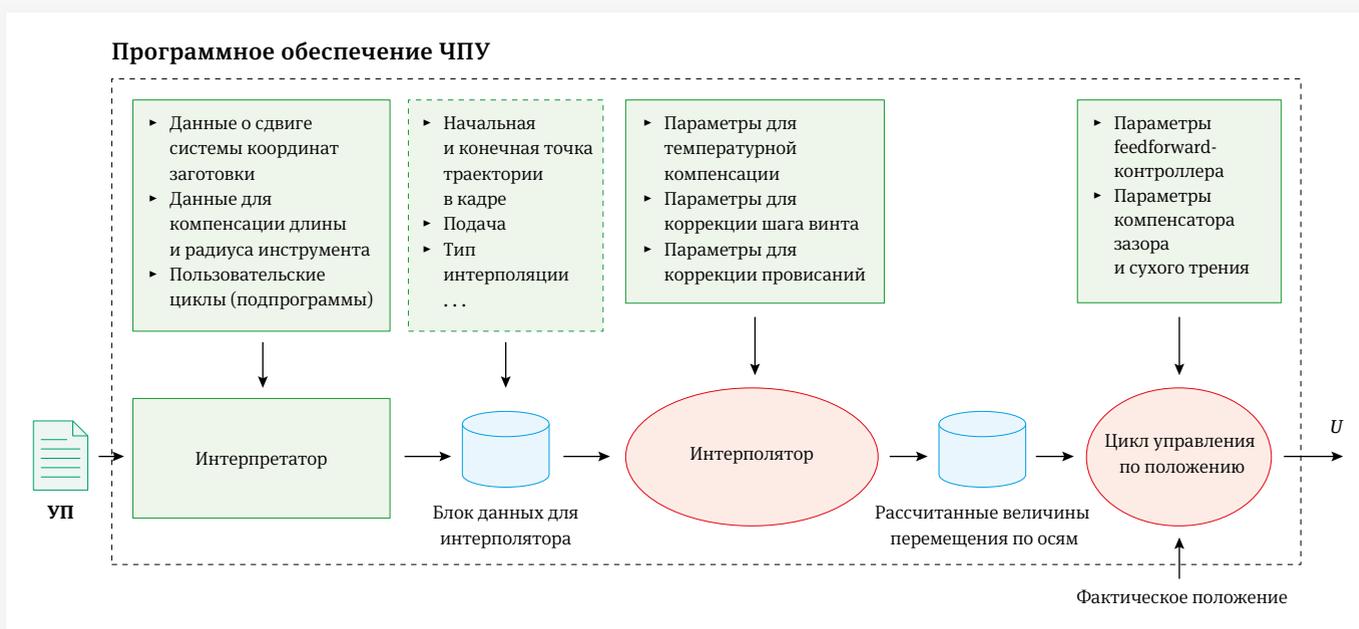


Рис. 7. Поток данных через систему ЧПУ

- Способ коррекции данных до интерполирования, реализуемый в интерпретаторе, который работает не в режиме реального времени. Этот способ в настоящее время не может быть реализован из-за запрета на модифицирование кода интерпретатора для введения дополнительной функциональности.
- Способ коррекции опорных точек управляющей программы в постпроцессоре, в который поступает дополнительная информация о точности станка в виде файла «облако интегральных отклонений» (рис. 7).

Интенсивное развитие средств вычислительной техники открывает новые возможности для развития способа коррекции опорных точек управляющей программы в постпроцессоре, в который поступает дополнительная информация о точности станка в виде файла «облако интегральных отклонений».

В данном случае (рис. 8) на вход постпроцессора поступают два файла: файл промежуточных данных с координатами инструмента $[x_i, y_i, z_i, a_i, b_i]$ в системе координат детали и файл с интегральными отклонениями $[\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta z_m, \Delta a_m, \Delta b_m]$ в системе координат рабочей зоны станка. На основе заложенной кинематической модели выполняется преобразование опорных точек координат инструмента $[x_i, y_i, z_i, a_i, b_i]$ в опорные точки в координатах станка $[x_m, y_m, z_m, a_m, b_m]$. Расчет коррекции производится путем решения задачи многокоординатной интерполяции, то есть для каждой опорной точки траектории определяется соответствующее ей интегральное отклонение, задается соответствующее смещение опорной точки. Далее осуществляется проверка точности «движения по скорректированной траектории» путем вычислительного эксперимента в блоке проверки на точность коррекции. Это необходимо по той причине, что расстояние между соседними опорными точками траектории,

определяемое заданной точностью аппроксимации траектории в САМ-системе, может быть достаточно большим, и интегральное отклонение на данном участке может меняться не в соответствии с кривой интерполяции, выбранной в САМ-системе.

В случае если это различие δ_k больше допуска δ на точность коррекции, то возникает необходимость введения дополнительных промежуточных опорных точек. После введения дополнительных опорных точек выполняется пересчет коррекции. Процедура продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие $\delta_k < \delta$. После того как полностью сформирован массив скорректированных ОТ, формируется окончательно скорректированная управляющая программа обработки данной детали и передается на конкретный станок с ЧПУ.

В работе [13] было замечено, что постпроцессор в программном управлении многокоординатной машиной является специфической формой реализации математической (векторной) модели решения обратной задачи – вычисления управляющих сигналов (управляющей программы) для машины с заданной кинематической схемой и заданными размерами («геометрией») звеньев.

Можно предположить, что развитие средств вычислительной техники в недалеком будущем позволит размещать постпроцессор непосредственно в системе ЧПУ станка. В этом случае реализация задачи полной коррекции в соответствии с векторной математической моделью значительно упрощается и может быть реализуема через коррекцию «геометрии» кинематической модели машины (размеры звеньев и их расположение в пространстве).

На рис. 9 представлена схема потоков данных при изготовлении деталей с расширенной системой ЧПУ

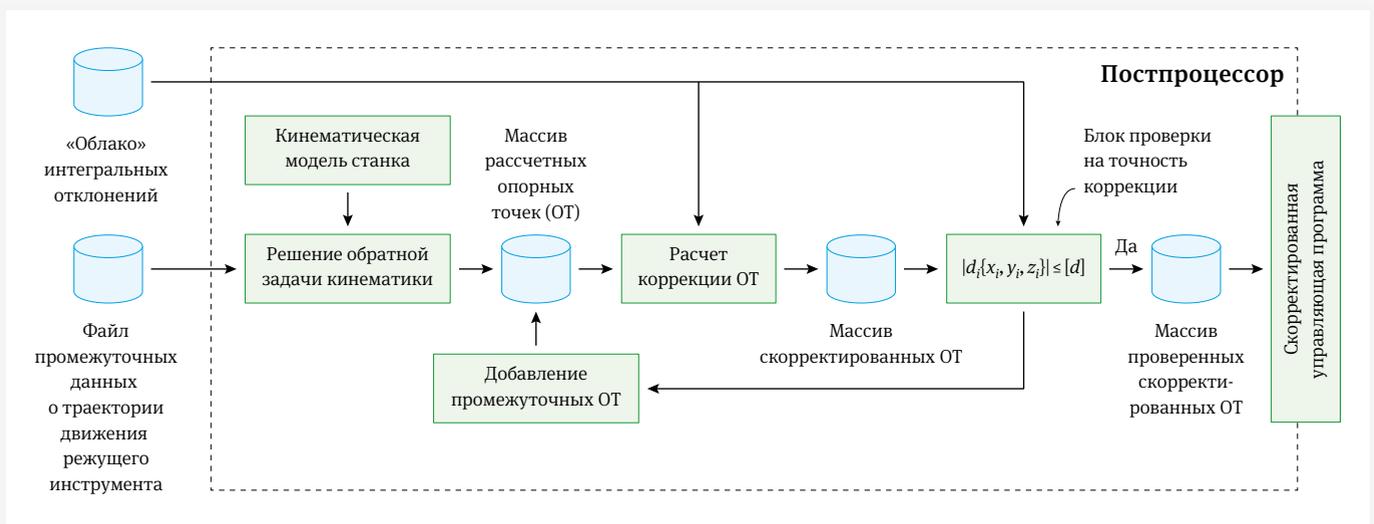


Рис. 8. Коррекция опорных точек управляющей программы в постпроцессоре

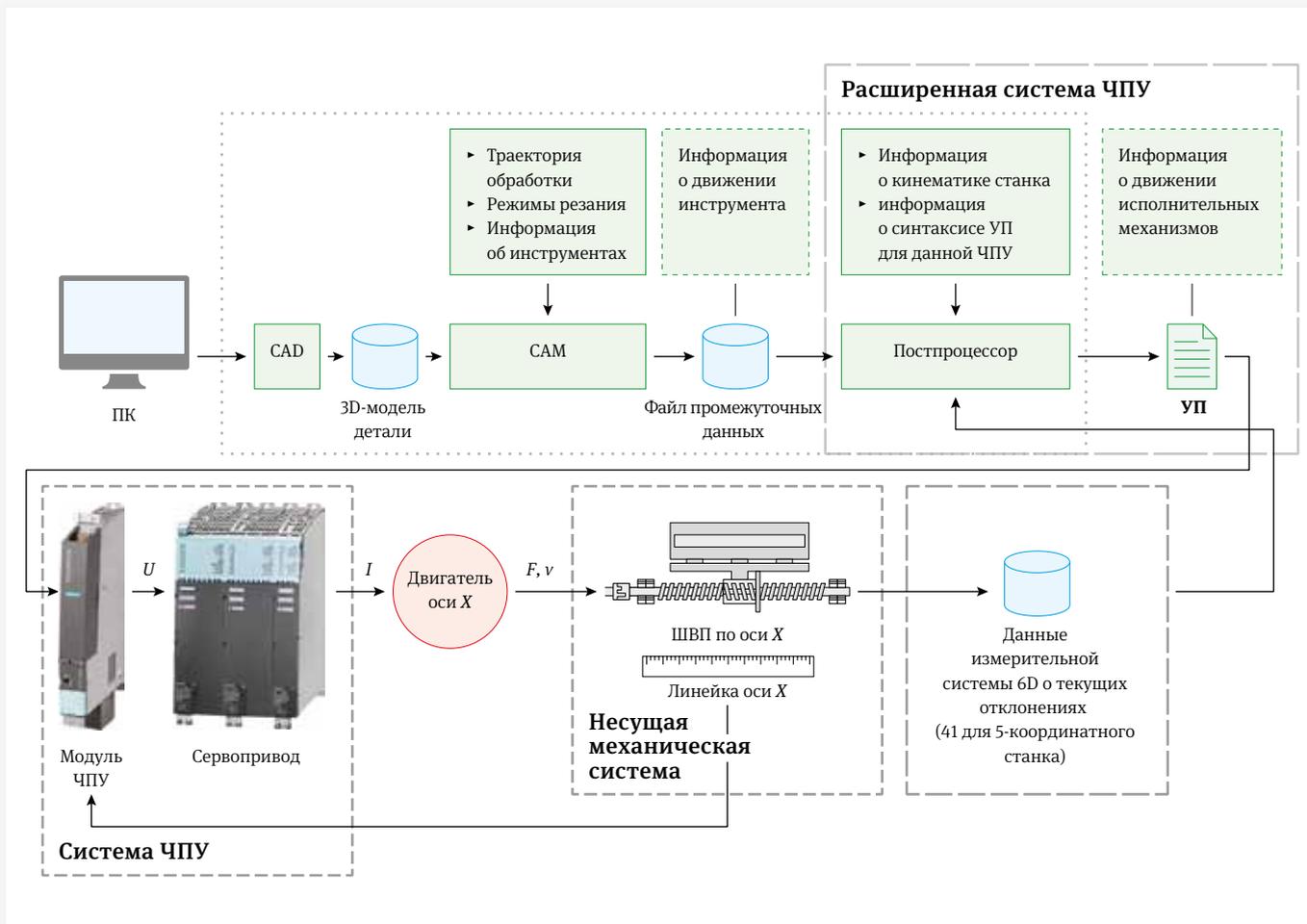


Рис. 9. Схема потоков данных при изготовлении деталей с «расширенной» системой ЧПУ (полная коррекция первичных отклонений движения инструмента относительно обрабатываемой детали)

в соответствии с рассмотренной стратегией повышения точности многокоординатной машины с ЧПУ.

Работа выполнена по плану бюджетных работ ИМАШ РАН.

Выводы

Необходимо восстановить в Российской Федерации (НПЗ) серийное изготовление лазерных интерферометров с соответствующей оптикой для целей калибровки технологического многокоординатного оборудования с ЧПУ и наладить поисковые научно-исследовательские работы по созданию средств измерения отклонений 6D при программном движении исполнительных органов.

Зарубежные коммерческие средства калибровки 6D существенно продвинулись для узлов машин, реализующих линейное движение.

За рубежом ведутся интенсивные поисковые научно-исследовательские работы, направленные на создание средств калибровки 6D для поворотных узлов машин

(столы, поворотные головки, шпиндели прецизионных токарных станков с ЧПУ).

Также за рубежом реализуется начальный этап работы по миниатюризации средств измерения 6D для целей встраивания в конструкцию многокоординатных станков с ЧПУ.

Необходимо дальнейшее развитие работ по созданию современных систем постпроцессоров, встраиваемых в системы ЧПУ с функциями полной цифровой коррекции.

Литература

1. **McKeown P. A.** The role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future. Annals of the CIRP; Keynote; Vol. 36 / 2; 1987.
2. **Shore P. and Morantz P.** Ultra-precision: enabling our future (review). Phil. Trans. R. Soc. A (2012) 370, pp. 3993–4014.
3. **Серков Н. А.** Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. М.: ЛЕНАНД, 2015. 304 с.

4. **Marsh Eric R.** Precision Spindle Metrology (lionprecision.com) URL: <https://www.lionprecision.com/wp-content/uploads/2019/08/psm-sample.pdf> (дата обращения: 07.06.2022)
5. **Geng et al.** Light: Advanced Manufacturing (2021) 2:14. Review of geometric error measurement and compensation techniques of ultra-precision machine tools URL: <https://www.light-am.com/en/article/doi/10.37188/lam.2021.014> (дата обращения: 07.06.2022).
6. **Ni H., Zhao W., Qiu L.** Measurement method of spindle motion error based on composite laser target. International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 174, March 2022, 103860 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089069522000116> (дата обращения: 07.06.2022).
7. LaserTRACER – Sub-µm im Raum messen / Прибор для измерения отклонений от траектории движения в пространстве ф. ETALON AG // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.etalon-ag.com> (дата обращения: 08.06.2022).
8. KERN Micro – The compact all-rounder, URL: https://superadvtech.com/catalogue/KERN_Micro.pdf (дата обращения: 08.06.2022)
9. Многокоординатный обрабатывающий центр модели MC-300. URL: <http://www.niat.ru/data/org/1429224423/1429809598/1429809796/1450013742/>. (дата обращения: 08.06.2022).
10. **Liu C-S, Zeng J-Y, Chen Y-T.** Development of positioning error measurement system based on geometric optics for long linear stage // Int J Adv Manuf Technol (2021) 115, pp. 2595–2606.
11. **Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F.** Geometric error measurement and compensation of machines // CIRP Annals / Manufacturing Technology. 2008. V. 57. № 2. PP. 660–675.
12. **Ловыгин А. А., Теворовский Л. В.** Современный станок с ЧПУ и CAD / CAM-система. М.: ДМК Пресс, 2015. 280 с.
13. **Пась О. В. и Серков Н. А.** Повышение точности движения по траектории путем коррекции управляющей программы по результатам калибровки многокоординатной машины с ЧПУ // В сб.: XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2019). Сборник трудов конференции. 2020. С. 506–509.

Авторы

Серков Николай Алексеевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН

Пась Олег Викторович – начальник отделения ФГУП «НПО «Техномаш» им. С. А. Афанасьева»



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 2600 руб.

Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б.

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 648 с. ISBN 978-5-94836-447-6

Книга посвящена новейшим технологиям, которые дают возможность на основе данных о виртуальных моделях твердых тел изготавливать физические модели в результате быстрых и легких производственных процессов. Авторы книги – признанные специалисты в области аддитивных технологий, имеющие многолетний опыт работы и исследований. Первое издание задумывалось как базовый учебник, объединивший все литературные источники, посвященные целям и задачам аддитивного производства (АП). Второе издание существенно переработано и дополнено, новая информация включена в дополнительные разделы и главы. Разработчики АП и представители промышленности найдут полезные сведения в этой книге, поскольку она поможет понять состояние дел в отрасли и перспективы дальнейших исследований. Издание предназначено также для преподавателей, студентов и аспирантов, изучающих аддитивное производство, может быть использовано в качестве автономного курса или как модуль в большой программе по технологии производства.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphere.ru; sales@technosphere.ru