

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

На правах рукописи



Серков Николай Алексеевич

ТОЧНОСТЬ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ: ТЕОРИЯ,
ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРАКТИКА

Специальности:

05.02.18 – Теория механизмов и машин

05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
д.т.н. Крупенин В. Л.

Москва - 2017

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА I. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ	22
1.1. Введение.....	22
1.2. Точность машины	24
1.3. Основные факторы, влияющие на точность машины	26
1.4. Направления повышения точности машины (станка)	28
1.4.1. Направления, связанные с совершенствованием конструкции НС машины и технологии её изготовления.....	31
1.4.2. Направления, связанные с совершенствованием процесса управле- ния машиной методами коррекции.....	33
1.4.2.1. Программная коррекция на основе априорной информации..	34
1.4.2.1.1. Предыскажение управляющей программы аналитическими ме- тодами.....	34
1.4.2.1.2. Коррекция по результатам калибровки станка, режущего ин- струмента и приспособления.....	35
1.4.2.2. Системы коррекции, основанные на принципе обратной связи (замкнутые системы).....	42
1.4.2.3. Системы коррекции, основанные на принципе компенсации возмущающих воздействий (управление по возмущению).....	45
1.4.3. Способы цифровой коррекции отклонений взаимного положения ИО многокоординатной машины с ЧПУ	46
ГЛАВА II. ПЕРВИЧНЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ ЗВЕНЬЕВ МЕХАНИЗМОВ С ПО- СТУПАТЕЛЬНЫМИ И ВРАЩАТЕЛЬНЫМИ ПАРАМИ И ПРАВИЛО ИХ ИЗ- МЕРЕНИЯ.....	50
2.1. Введение.....	50
2.2. Основные понятия теории точности механизмов применительно к механизмам несущей системы машины с ЧПУ	50

2.3. Первичные отклонения для механизма «управляемый по программе ползун»	55
2.4. Первичные отклонения для механизма «управляемый по программе шарнир».....	59
2.5. Несущая система машины.....	66
2.6. Общие замечания по определению первичных отклонений звеньев, входящих в другие кинематические пары.....	67
2.7. Выводы по главе.....	69
ГЛАВА III. МОДЕЛЬ ОТКЛОНЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ....	70
3.1. Введение.....	70
3.2. Математическая модель образования интегрального отклонения для 5 координатного станка.....	70
3.2.1. Декомпозиция НС станка на независимые управляемые по программе механизмы.....	70
3.2.1.1. Станина.....	73
3.2.1.2. Управляемый по программе механизм «Станина (1)→ X салазки (2)».....	73
3.2.1.3. Управляемый по программе механизм «Салазки (2) →Y стойка (3)».....	76
3.2.1.4. Управляемый по программе механизм «Стойка (3) → Z шпиндельная бабка (4)».....	78
3.2.1.5. Управляемый по программе механизм «Станина (1)→ В корпус планшайбы(5)».....	81
3.2.1.6. Управляемый по программе механизм «Корпус планшайбы(5) → С планшайба (6)».....	84
3.2.2. Интегральное отклонение позиционирования $\overline{\delta_{\Sigma 1}}$ относительно станины.....	86

3.2.3. Интегральное отклонение позиционирования $\overline{\delta_{\Sigma 2}}$ для планшайбы относительно станины.....	87
3.2.4. Интегральное отклонение позиционирования $\overline{\delta_{\Sigma}}$ для 5 координатного станка (3линейные и 2 угловые координаты).....	89
3.3. Имитационная модель образования интегрального отклонения для 5-ти координатного станка.....	89
3.3.1. Построение имитационной модели.....	89
3.3.2. Опробование имитационной модели на частных случаях формирования интегрального отклонения по первичным отклонениям для структуры станка мод. МС – 300.....	92
3.3.3. Использование имитационной модели для анализа объёмной точности 5 координатного станка с поворотным глобусным столом мод. МС 300.....	100
3.3.3.1. Расчёт контрольных точек в рабочем пространстве 5 координатного станка с глобусным поворотным столом.....	100
3.3.3.2. Методика проведения имитационного моделирования.....	104
3.3.3.3. Чувствительность критерия точности к изменению первичных отклонений (матрица чувствительности).....	107
3.3.3.4. Синтез точности многокоординатной машины с ЧПУс использованием имитационного моделирования.....	108
3.4. Выводы по главе.....	109
ГЛАВА IV. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРВИЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ЗВЕНЬЕВ МЕХАНИЗМОВ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИИ С ЧПУ.....	111
4.1. Введение.....	111
4.2. Основные понятия метрологии, необходимые для рассмотрения методов и средств измерения первичных отклонений звеньев механизмов.....	111
4.3. Измерение первичных отклонений.....	115

4.3.1. Измерение отклонений позиционирования вдоль линейных и угловых координат.....	116
4.3.1.1. Измерение отклонений позиционирования вдоль линейной координаты (E _{XX} , E _{YY} , E _{ZZ}).....	116
4.3.1.2. Измерение отклонений позиционирования по угловой координате (E _{BB} , E _{CC}).....	118
4.3.2. Измерение отклонений от прямолинейности (E _{YX} , E _{ZX} , E _{XY} , E _{ZY} , E _{XZ} , E _{YZ}).....	119
4.3.3. Измерение угловых отклонений подвижного узла при линейных и угловых перемещениях (E _{AX} , E _{BX} , E _{CX} , E _{AY} , E _{BY} , E _{CY} , E _{AZ} , E _{BZ} , E _{CZ} , E _{AB} , E _{CB} , E _{AC} , E _{BC}).....	121
4.3.4. Измерение осевого и радиального биения поворотных столов (E _{XВ} , E _{YВ} , E _{ZВ} , E _{XС} , E _{YС} , E _{ZС}).....	123
4.3.5. Измерение отклонений от перпендикулярности движений подвижного узла, участвующего в двух взаимно перпендикулярных перемещениях (θ_{xy} , θ_{xz} , θ_{yz}).....	125
4.3.6. Измерение отклонений пересечения осей В и С (Δ_{bcz} , Δ_{bcx}).....	126
4.3.7. Измерение отклонений от перпендикулярности осей В и С (θ_{bc}) и отклонений от перпендикулярности оси В к пл. X ₀ Z ₀ (θ_{bxz} , θ_{bxy}).....	129
4.4. Выводы по главе.....	135
ГЛАВА V. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ С ЧПУ.....	137
5.1. «Объёмная» точность станка.....	137
5.2. Методы и средства оценки «объёмной» точности станка.....	138
5.2.1 Оценка объёмной точности станка измерением отклонений воспроизведения эталонной траектории.....	141
5.2.1.1. Приборы, реализующие способ измерения с применением калиброванного механизма.....	141

5.2.1.1.1. Приборы со степенью подвижности 1.....	142
5.2.1.1.2. Приборы со степенью подвижности 2.....	145
5.2.1.1.3. Приборы со степенью подвижности 3.....	152
5.2.1.2. Приборы, реализующие способ измерения с применением образцовой детали (artifact)	165
5.2.2. Способ оценки объёмной точности станка, основанный на измерении «следа» действительной траектории на обработанной поверхности.....	166
5.3. Выводы по главе.....	171
ГЛАВА VI. ВЛИЯНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ (ВЕСА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДВИЖНЫХ УЗЛОВ) НА ТОЧНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ИО МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ	173
6.1. Этапы создания многокоординатной машины и виды экспериментальных исследований статических и динамических свойств её несущей системы	173
6.2. Квазистатический режим испытаний геометрической точности многокоординатной машины с ЧПУ (состояние 2).....	177
6.2.1. Влияние статической жесткости узлов машины на первичные отклонения механизмов.....	178
6.2.1.1. Изменение точности позиционирования станка «Гексамех-1» при изменении жесткости его несущей системы.....	178
6.2.1.2. Связь «отклонений от прямолинейности в пл. YZ» при движении стойки по координате Y с деформациями каретки при перемещении стойки для станка мод. МС - 300.....	181
6.2.1.3. Исследование отклонений от перпендикулярности движения шпиндельной бабки в пл. YZ.....	184
6.2.1.4. Исследование отклонений от перпендикулярности движения шпиндельной бабки в пл. XZ	188

6.2.1.5. Выводы по результатам исследования влияния веса подвижных узлов на отклонения от прямолинейности и перпендикулярности движения.....	190
6.2.2. Влияние температурных деформаций узлов станка на первичные отклонения механизмов несущей системы станка.....	192
6.2.2.1. Влияние температурных деформаций на точность позиционирования по линейным координатам.....	193
6.2.2.1.1. Точность позиционирования по координате X.....	194
6.2.2.1.2. Точность позиционирования по координате Y.....	195
6.2.2.1.3. Точность позиционирования по координате Z.....	203
6.2.2.2. Влияние температурных деформаций на точность позиционирования по угловым координатам.....	207
6.2.2.2.1. Точность позиционирования планшайбы (координата C)	207
6.2.2.2.2. Точность позиционирования корпуса планшайбы (координата B).....	210
ГЛАВА VII. ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ (СИЛ ИНЕРЦИИ) НА ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИО МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ.....	213
7.1. Динамический режим испытаний на холостом ходу (состояние 3).....	213
7.1.1. Динамическая модель несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ.....	213
7.1.2. Поведение несущей системы в невозмущённом состоянии (режим а).....	217
7.1.3. Реакция несущей системы на силовое ступенчатое воздействие со стороны рабочего процесса (режим в).....	218
7.1.4. Реакция несущей системы на кинематическое «ступенчатое» воздействие через управляющую программу (режим г, «ступенчатое перемещение 10 мм» вдоль оси X с различной подачей).....	223

7.1.5. Точность воспроизведения заданных типовых траекторий (режим д).....	227
7.1.6. Влияние сил резания на точность воспроизведения заданной траектории (режим е).....	236
7.1.6.1. Методика измерения статической жесткости.....	287
7.1.6.2. Результаты исследования статической жесткости станка мод. МС – 300.....	242
7.1.6.3. Методика определения динамической податливости несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ.....	247
7.2. Элементы калибровки и диагностики многокоординатной машины при сборке.....	253
7.2.1. Алгоритм калибровки.....	253
7.2.2. Установление норм на проведение коррекции.....	254
7.2.3. Методика диагностики.....	255
7.2.4. Примеры проведения диагностики при нарушении норм на проведение коррекции.....	258
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	262
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	263
ПРИЛОЖЕНИЕ №1. Текст программы psd0.m	285
ПРИЛОЖЕНИЕ №2. АКТ об использовании результатов докторской диссертационной работы Серкова Николая Алексеевича.....	299
ПРИЛОЖЕНИЕ № 3. Текст программы psd43.m	301
ПРИЛОЖЕНИЕ № 4. Координаты контрольных точек для анализа объёмной точности.....	319
ПРИЛОЖЕНИЕ № 5. Первичные отклонения.....	320
ПРИЛОЖЕНИЕ № 6. Матрица чувствительности.....	335

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время остро стоит задача обновления оборудования в машиностроении. Руководством страны поставлена задача к 2020 г. не менее чем на 70% обновить технологическую базу предприятий стратегических отраслей промышленности и ОПК [26].

Среди приоритетных направлений развития машиностроения, обеспечивающих развитие инновационных технологий, следует выделить:

- оснащение машиностроительного производства прецизионным оборудованием с высокой степенью концентрации технологических операций, выполняемых по программе от систем ЧПУ;

- повышение уровня автоматизации машиностроительного производства путем применения современных систем CAD-CAM и CIM, интегрирующих в единую систему обрабатывающие центры, промышленные роботы, измерительные машины, лазерные установки, оборудование аддитивной технологии, оборудование микрообработки и др.

Особая роль принадлежит многоцелевым многокоординатным станкам с системами ЧПУ типа CNC, позволяющим обрабатывать сложные прецизионные детали за одну установку.

Эффективная обработка сложных поверхностей таких ответственных деталей, как рабочие колёса турбин, винтовые пары насосов, гребные винты, пресс-формы и др., возможна лишь при взаимосвязанном относительном движении инструмента и заготовки по 5 и более координатам. В частности, обработка сложных поверхностей на 5 координатных станках является основой эффективного изготовления монолитных конструкций из поковок или проката в мелкосерийном производстве (несущие детали самолёта, рабочие моноколёса турбин, протезы суставов и др.). При этом остаётся особо важной задача получения готовой детали сразу, без пробной обработки.

Обработка корпусных деталей, типа блоков цилиндров двигателей автомобилей, с одной установки на современных 5 координатных многоцелевых станках с ЧПУ конкурирует с обработкой на автоматических линиях.

Многоцелевые станки, промышленные роботы, измерительные машины, лазерные установки и «3-D принтеры» являются классическими примерами многокоординатных машин с ЧПУ. Также несущая система радиолокаторов, антенн, оптических и радиотелескопов и аналогичного оборудования двойного назначения является многокоординатной.

Исполнительные органы многокоординатной машины с ЧПУ в процессе работы движутся по сложным пространственным траекториям. Требования к точности и скорости движения по сложным пространственным траекториям постоянно возрастают.

Многокоординатная машина с ЧПУ – это совокупность механизмов, осуществляющих движение исполнительного органа по заданной траектории в пространстве путем взаимосвязанного управления отдельными координатными приводами.

Точность позиционирования современного прецизионного 5 координатного станка по одной координате должна быть на уровне 1мкм [130]. Ещё более высокие требования по точности предъявляются к измерительным машинам, астрономическим приборам и высокоточному вооружению. Постоянно повышаются требования к точности обработки траектории современным технологическим роботом.

Таким образом, обеспечение высокой точности высокоскоростных многокоординатных машин с ЧПУ при их изготовлении и эксплуатации является важной задачей современного отечественного и зарубежного машиностроения.

Создание высокоточных многокоординатных машин с ЧПУ непосредственно связано с решением задач анализа и синтеза точности их несущих систем.

Основы точности механизмов были заложены академиком Н.Г. Бруевичем. Методы расчёта точностных параметров механизмов машин и приборов (включая вероятностные) были развиты Калашниковым Н.А., Колчиным Н.И., Булатовым В. П., Фридлиндером И.Г., Сергеевым В.И., Тимофеевым Б.П., Бородачёвым Н.А., Цуккерманом С.Т., Архангельским Л.А, Махровским В.Г., Коченовым М.И., Тайц Б. А., Кайнером Г.Б., Павловым Б.И., Правоторовой Е.А. и др.

Вопросы анализа и синтеза механизмов параллельно - последовательной структуры с позиций обеспечения точностных показателей машин, в частности, роботов и манипуляторов, рассматривались в работах Коловского М. З., Глазунова В. А., Колискова А. Ш., Подураева Ю. В., Корендясева А. И., Болотина Л. И., Саламандры Б. Л., Тывеса Л. И., Ющенко А. С., Медведева В. С., и др.

Большой вклад в решение задач анализа и синтеза структуры многокоординатного станка по критерию точности внесли Решетов Д. Н., Базров Б. М. [10], Портман В. Т. [76], и др.

В 50-60-е годы прошлого столетия наряду с мероприятиями, направленными на усовершенствование конструкции и технологии изготовления многокоординатной машины, стали интенсивно развиваться методы достижения заданной точности движения её выходного звена за счёт использования принципов адаптации в системе управления и более полной информации (априорной, текущей, апостериорной).

Это направление получило ещё большее развитие с возникновением мехатроники - области науки и техники, основанной на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением функциональными движениями. [123, 70, 120].

Большой вклад в развитие этого направления внесли отечественные учёные: Балакшин Б. С., Кобринский А. Е., Соломенцев Ю. М., Колисков А.

Ш., Ратмиров В. А., Вульфсон И. А., Шмутер С. А., Базров Б. М., Анисимов Б. В., Тимофеев А.В., Гусев И. Т., Невельсон М. С., Тимирязев В. А. и др.

В адаптивных системах управления получают широкое развитие методы коррекции, основанные на измерении первичных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ и внесении коррекции в траекторию движения в реальном масштабе времени через интерполятор системы ЧПУ. Коррекция отрабатывается совместно с номинальными перемещениями через линейные и угловые приводы машины.

Наибольший вклад в развитие знаний о первичных отклонениях и их связи с отклонениями исполнительных органов применительно к металлорежущим станкам и измерительным машинам внесли: Проников А. С., Каспарайтис А. Ю. [32-33], Bryan J. B., Schwenke H., Knapp W. [161], McKeown P.A., Donmez M. [143], Hocken R. [155], Zhang G.[200], Soons, J., Spur, G.[190], Sartori S. [168], Trapet E., Schultschik R. [185-186], Ertl F., Bringmann B., Ziegert J., Schmitz T., Balsamo A. и др.

Полная компенсация отклонений исполнительных органов машины, рассчитываемых в соответствии с имитационной моделью, может быть реализована только на 5 (и более) координатных машинах (станках) с вычислительными средствами, позволяющими «просчитывать» имитационную модель в цикле интерполирования < 2 мс [184].

В современных системах управления станками, например, Siemens 840 D [187], коррекция каждого отдельного отклонения не требует сложных вычислений (отклонения позиционирования по каждой линейной и угловой координате, а также отклонения от прямолинейности и от перпендикулярности движения по каждой линейной координате) и осуществляется отдельным вычислительным процессом. Эти вычислительные процессы выполняются в квазипараллельном режиме и не требуют больших вычислительных ресурсов. Все коррекции, относящиеся к данной линейной координате, суммируются и отрабатываются соответствующим приводом в режиме интерполиро-

вания. По угловым координатам осуществляется только коррекция отклонений позиционирования.

Интенсивно ведутся работы по реализации коррекции по результатам измерения отклонений исполнительных органов машины в функции координат рабочего пространства [147, 193]. Этому способствуют новые появившиеся измерительные средства, включая образцовые изделия (artifacts).

Предполагается, что в ближайшее время 30-50 % всех изготавливаемых станков будут выпускаться с коррекцией [184] отклонений позиционирования по линейным и угловым координатам и отклонений от прямолинейности и перпендикулярности.

Координатные измерительные машины практически все выпускаются с программной коррекцией результатов измерений по данным о первичных отклонениях или отклонениях исполнительных органов.

В связи с этим становятся особенно важными вопросы рекалибровки (recalibration) и связанные с ними вопросы диагностики точности многокоординатных станков с ЧПУ.

Определение баланса точности (распределение «вклада» звеньев в интегральное отклонение выходного звена, кинематических пар) и построение матрицы чувствительности являются главными задачами анализа точности многокоординатной машины.

Определение направлений расширения точностных возможностей многокоординатных машин с ЧПУ и разработка новых способов цифровой коррекции траектории движения исполнительных органов являются основными задачами синтеза точности многокоординатной машины.

Актуальность темы

Обобщая сказанное, можно констатировать актуальность диссертационной работы, направленной на развитие теоретических и экспериментальных основ анализа и синтеза точности многокоординатных машин с ЧПУ.

Направлениями развития теоретических и экспериментальных основ анализа, синтеза и диагностики точности многокоординатных машин с ЧПУ являются:

- Систематизация и анализ направлений повышения точности многокоординатных машин с ЧПУ в контексте повышения точности воспроизведения траектории в пространстве.

- Построение (синтез) матричных (векторных) и имитационных моделей образования отклонений исполнительных органов многокоординатных машин с ЧПУ при различных способах повышения точности. Разработка методики анализа точностных возможностей многокоординатных машин с ЧПУ, основанной на использовании имитационной модели отклонений положения исполнительных органов по первичным отклонениям.

- Синтез алгоритмов определения корректирующих поправок, вносимых в траекторию движения исполнительных органов машины с ЧПУ.

- Классификация и систематизация методов и средств измерения первичных и интегральных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ.

- Разработка динамической модели несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ для анализа поведения несущей системы в различных режимах и синтеза конструктивных схем машин повышенной динамической точности обработки пространственных траекторий.

- Накопление и систематизация экспериментальных данных испытаний на холостом ходу многокоординатных многоцелевых станков с ЧПУ для анализа точностных возможностей многокоординатных машин и синтеза конструктивных схем повышенной динамической точности.

- Обобщение информации о связи дефектов изготовления узлов и сборки машины с первичными отклонениями механизмов и с отклонениями исполнительных органов машины с целью развития системы диагностики точности многокоординатных машины в процессе их сборки и эксплуатации.

Целью работы является разработка методов и средств анализа и синтеза точности многокоординатной машины с ЧПУ.

Для достижения поставленной цели были рассмотрены и решены следующие **задачи**:

1. Провести анализ первичных отклонений механизмов с поступательными и вращательными парами на примере НС последовательной структуры станка мод. МС – 300 и разработать схемы и методики их измерений.

2. Разработать математическую и имитационную модели образования интегральных отклонений ИО многокоординатной машины с ЧПУ.

3. Разработать методику анализа точности многокоординатной машины с ЧПУ методом имитационного моделирования и провести исследование баланса точности конкретного станка мод. МС – 300.

4. Синтезировать алгоритм поиска поправок для модифицированного способа коррекции квазипараллельными вычислительными процессами.

5. Систематизировать и провести анализ эффективности методов и средств измерений первичных и интегральных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ.

6. Разработать метод и создать универсальное приспособление для измерения отклонений пересечения осей вращения в многокоординатных машинах с ЧПУ.

7. Развить способ оценки объёмной точности станка, основанный на измерении «следа» действительной траектории на обработанной поверхности на примере исследования точности станка параллельной структуры (Гексамех-1).

8. Исследовать влияния квазистатических возмущающих факторов (веса, температуры) на первичные отклонения механизмов многокоординатной машины с ЧПУ с целью применения цифровой коррекции.

9. Создать методику исследования влияния инерционных сил на точность воспроизведения пространственной траектории ИО многокоординатной машины с целью повышения динамических свойств НС.

10. Разработать элементы калибровки и диагностики точности многокоординатной машины при её сборке.

Научная новизна работы заключается:

- во введении понятия механизма «управляемый по программе ползун/шарнир», выходное звено которого движется по направляющим (стойке) с 6 первичными отклонениями, описываемыми в функции управляемой координаты;

- в методике построения модели образования интегральных отклонений ИО многокоординатной машины с НС последовательной структуры с кинематическими парами, приводящимися к парам с одной степенью свободы;

- в установлении правила измерений первичных отклонений механизмов;

- в разработанных математической и имитационной моделях образования отклонений ИО многокоординатной машины;

- в разработанной методике анализа точности многокоординатной машины с ЧПУ методом имитационного моделирования;

- в синтезе алгоритма определения корректирующих поправок для модифицированного способа коррекции первичных отклонений квазипараллельными вычислительными процессами;

- в разработанном методе и созданном устройстве для измерения отклонений пересечения осей поворота ИО;

- в динамической модели НС многокоординатной машины с ЧПУ и методике определения динамической податливости НС;

- в методике калибровки и диагностики точности многокоординатной машины при её сборке.

Достоверность полученных результатов диссертации подтверждается:

- применением фундаментальных положений механики,
- проведением измерений первичных и интегральных отклонений механизмов на современном измерительном оборудовании и современном многокоординатном станке,
- сопоставлением результатов проведенного имитационного моделирования с рядом известных частных решений,
- использованием информации о различных методах и средствах измерений из достоверных литературных источников.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1) Создана имитационная модель вычисления отклонений ИО по первичным отклонениям звеньев механизмов для 5 координатных машин последовательной структуры, архитектура построения которой может быть положена в основу блока полной коррекции в создаваемых системах ЧПУ. С помощью этой модели могут проводиться исследования точности многокоординатной машины с ЧПУ, в частности, определяться баланс точности и выявляться резервы её повышения.

2) Предложен модифицированный способ коррекции первичных отклонений квазипараллельными вычислительными процессами на основе созданной имитационной модели.

3) Проведенная систематизация методов и средств измерений, первичных и интегральных отклонений многокоординатных машин с ЧПУ существенно облегчает выбор измерительных средств для проведения испытаний машин на точность и указывает направления создания недостающих измерительных средств.

4) Разработанные метод и устройство для измерения отклонений пересечения осей поворота в многокоординатных машинах с ЧПУ позволяют существенно повысить точность юстировки и уменьшить трудоёмкость сборочных работ.

5) Выявленные связи дефектов изготовления станка мод. МС - 300 с первичными отклонениями механизмов позволяют определить скрытые дефекты и причины их возникновения на стадии отладки машины (используется при изготовлении многокоординатных станков и другого технологического оборудования в ОАО НИАТ).

Реализация результатов работы. Работы выполнялись в ИМАШ РАН по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2004 - 2012 годы по темам: 3-04 «Разработка основ теории и методов синтеза перспективных механизмов и машин с улучшенными рабочими и эксплуатационными характеристиками», 2-09 «Разработка методов анализа и синтеза многофункциональных механизмов и машин для перспективных технологий» и на 2013 - 2020 годы по теме 1.13. «Разработка методов анализа и синтеза новых классов механизмов и технологических процессов для машин новых поколений», а также в рамках сотрудничества с ОАО НИАТ по линии ЦКП при ИМАШ РАН «Исследование и диагностика точности и жесткости многокоординатных машин».

На защиту выносятся:

- принцип повышения точности, заключающийся в сочетании конструктивных и технологических методов уменьшения случайной составляющей отклонений и цифровой коррекции, направленной на компенсацию систематической;
- методика построения (синтеза) матричной и имитационной модели образования отклонений ИО многокоординатной машины с ЧПУ;
- метод анализа точности многокоординатных машин с ЧПУ на основе имитационного моделирования отклонений воспроизведения пространственной траектории;
- методика синтеза алгоритма определения корректирующих поправок для модифицированного способа коррекции первичных отклонений квазипараллельными вычислительными процессами;

- правило проведения измерений первичных отклонений и систематизация средств измерения первичных и интегральных отклонений;
- метод и устройство для измерения отклонений пересечения осей поворота для 5 координатных машин с ЧПУ;
- результаты экспериментальных исследований влияния силовых и температурных деформаций НС станка мод. МС - 300 на первичные отклонения и мероприятия по их уменьшению;
- динамическая модель НС многокоординатной машины с ЧПУ и методика определения динамической податливости НС;
- элементы калибровки и диагностики точности многокоординатной машины, базирующихся на выявленных устойчивых связях дефектов изготовления машины с первичными и интегральными отклонениями механизмов (отклонениями позиционирования).

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и научно-технических симпозиумах: на семинаре «The 5th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar» (Germany, Chemnitz, 2006 г.), на XV Международном Симпозиуме: «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» (Москва-Зеленоград, 2006 г), на Международной конференции по теории механизмов и механике машин», (г. Краснодар, 2006 г), на Международной конференции по теории механизмов и механике машин», (г. Астрахань, 2007 г), на VIII Международной научно-технической конференции по динамике технологических систем (Ростов-Дон, 2007 г.), на научной конференции «Ориентированные Фундаментальные исследования РФФИ – Федеральные целевые программы, наукоемкое производство» (Москва, 2007 г.), на научной конференции «Ориентированные фундаментальные исследования – новые модели сотрудничества в инновационных процессах» (Москва, 2008 г.), на международной конференции «Проблемы машиноведения» (Москва, 2008 г.), на XVI Международном Симпозиуме: «Динамика виброударных (сильно нелинейных) (Москва-

Зеленоград, 2009 г.), на международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении» (Москва, 2010), на Десятой сессии международной научной школы, посвященной памяти В.П. Булатова «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», (Санкт-Петербург, 24-28 октября 2011 г.), на II международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (Москва, 2012), на X Международном научно-техническом форуме «ИННОВАЦИЯ, Экология и РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ (ИнЭРТ-2012)» (Ростов н/Д, 2012г.), на Одиннадцатой сессии международной научной школы, посвященной памяти В.П. Булатова «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», (Санкт-Петербург, 21-25 октября 2013 г.), на международной конференции «МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ», посвященной 75-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, 21-22 ноября 2013 г.), на III Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении” FRITME-2014, ИМАШ РАН, Москва, Россия, 13-15 мая 2014 г., на XVIII Международном Симпозиуме «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» - DYVIS-2015, посвященный 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А.Е Кобринского (Москва – Бекасово, 17-23 мая 2015 г., на International Conference VIBROENGINEERING-2016: DYNAMICS OF STRONGLY NONLINEAR SYSTEMS Moscow, Russia October 4 – 7, 2016.

Публикации

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 56 печатных работах. Из них 27 статей в журналах, указанных в перечне ВАК России, 3 авторских свидетельства и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, 187 рисунков, 14 таблиц, 10 основных выводов результатов, списка использованной литературы (201 наименования) и 6 приложений.

ГЛАВА I. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ

1.1. Введение

В настоящее время остро стоит задача обновления оборудования в машиностроении. Повышение мощности, быстроходности и экономичности изготавливаемых машин требует опережающего повышения точности металлорезающих станков, на которых они изготавливаются [72].

Среди приоритетных направлений развития машиностроения, обеспечивающих резкое увеличение производительности при существенном повышении качества продукции, следует выделить:

1) Оснащение машиностроительного производства оборудованием с высокой степенью концентрации различных технологических операций на одном обрабатывающем центре с полной обработкой детали за один «установ». Основу такого оборудования составляют 5 координатные обрабатывающие центры. По данным JIMTOF с 2000 г. по 2006 г. число 5-координатных многоцелевых станков с ЧПУ выросло с 8,2% до 34,2% к объёму выпускаемых станков с ЧПУ. Эта тенденция сохраняется.

2) Оснащение машиностроительного производства прецизионным технологическим оборудованием микронного, субмикронного и нанометрического уровня точности (обрабатывающие центры класса точности П, В, А, С), в частности, для микрообработки.

Применительно к прецизионному оборудованию можно отметить, что его точность из года в год неуклонно повышается. На рис. 1.1 представлено изменение показателя точности ε по годам до 1980 г. и прогноз, сделанные проф. Taniguchi [192], который в основной части оправдался. Можно предположить, что в ближайшие 1-2 десятилетия станет нормой для серийно выпускаемых многоцелевых станков с ЧПУ точность позиционирования по одной координате на уровне 0,1 мкм. В настоящее время для станка мод. DHP 50 точность позиционирования по одной координате составляет 0,99 мкм.

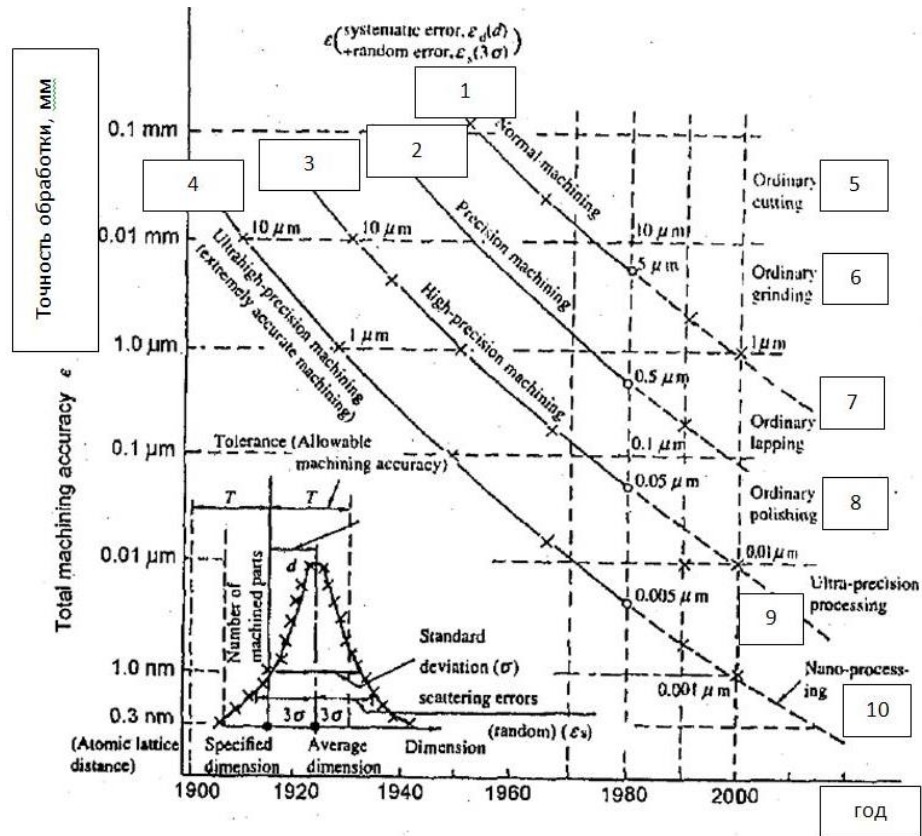


Рис. 1.1. Прогноз изменения точности обработки (проф. Taniguchi), сделанный в 1980^е годы: 1 - обычная обработка, 2 - прецизионная обработка, 3 – особо прецизионная обработка, 4 – ультра прецизионная обработка, 5 – обычное лезвийное резание, 6 – обычная абразивная обработка, 7 – обычная доводка, 8 – обычное полирование, 9 - ультрапрецизионная обработка, 10 – нанообработка

Точность движения по траектории при 5-ти координатной обработке существенно отличается от точности позиционирования по одной координате. Фирма DIXI гарантирует точность позиционирования по одной координате для 4-х и 5-ти координатных станков мод. DHP 50 и мод. DHP 80 в пределах 0,99 мкм, а по данным [130] точность в объёме (3D) для 4-х координатного станка той же фирмы DIXI составляет уже 15 мкм, а для 5-ти координатных станков 25-35 мкм. У других изготовителей аналогичных станков данный показатель точности может превышать 100 мкм.

Создание 3 и 5-координатных обрабатывающих центров с гибридной кинематикой для механической обработки деталей сложной формы с по-

грешностями размеров менее 4 мкм предусмотрено в ПОДПРОГРАММЕ "Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности" на 2011 - 2016 годы федеральной целевой программы "Национальная технологическая база" на 2007 - 2011 годы [69].

Развитие машиностроения (инновационного) связано с непрерывным повышением требований к точности многокоординатных машин (станков, КИМ, промышленных роботов, и другого многокоординатного технологического оборудования). Точность технологических машин в решающей степени определяет точность изготавливаемых на них изделий. Без преувеличения, можно отметить, что прецизионная обработка, особенно ультрапрецизионная, является технологическим ключом 21 века.

Ниже рассмотрение основных направлений повышения точности многокоординатных машин с ЧПУ будем проводить на примере логики развития направлений повышения точности металлорежущих станков, потому что наибольшие достижения в области точности машин достигнуты применительно к станкам. Эти достижения распространяемы для других многокоординатных машин с ЧПУ.

1.2. Точность машины

Рассмотрим понятие и определение точности машины на примере точности станка.

Точность станка - *мера* приближения действительных параметров точности к нулевым значениям.

Требования к точности станков регламентируются государственными стандартами на нормы точности и техническими условиями на изготовление.

Нормы точности на изготовление станков устанавливаются на основе статистических данных и требований к точности изготавливаемых на них изделий (деталей) [28]. Нормы точности определяют допуски на контролируемые параметры изготавливаемого станка.

При определении точности станка измеряют показатели (параметры), а именно, отклонения формы и относительного положения линий и поверхно-

стей станка и траекторий движения их рабочих органов (ГОСТ 22267-76. СТАНКИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ. Схемы и способы измерений геометрических параметров).

Первоначально, до появления числового программного управления, точность станка подразделялась на геометрическую и кинематическую [28].

Геометрическая точность станка - это параметры, характеризующие:

- точность опорных поверхностей для базирования инструмента и заготовки (плоскостность рабочих столов, точность конусов для крепления инструмента и т. д.),

- точность движения рабочих органов в подшипниках и направляющих (точность вращения шпинделей, точность направления перемещений столов и суппортов и т.д.),

- точность взаимного расположения направляющих движения рабочих органов (параллельность и перпендикулярность направлений движения суппортов, столов, шпиндельных бабок и т.д.), (перпендикулярность направляющих, перпендикулярность осей вращения столов глобусных и т.д.),

- точность расположения направляющих относительно базовых поверхностей (параллельность и перпендикулярность оси шпинделя и направления перемещения суппортов опорной поверхности стола и т.д.),

- точность позиционирования рабочих органов по координатам (осям) движения станка.

Указанные параметры точности применительно к механизму [14] получили название - первичные погрешности механизма.

Для станков, предназначенных для обработки сложных пространственных поверхностей (винтовые поверхности – токарно-винторезные станки, эвольвентные поверхности – зуборезные станки и др.) *специально* для оценки отклонений траекторий движения рабочих органов кроме перечисленных выше параметров используются параметры, характеризующие кинематическую точность станка.

В работе [28] д.т.н., проф. Д.Н. Решетов дает определение кинематической точности: «Кинематическая точность характеризуется согласованностью взаимосвязанных относительных движений органов, несущих инструмент и заготовку, и точностью периодического деления и установки (точность цепи деления от шпинделя к ходовому винту, точность цепи обката в зуборезных станках и т.д.).»

После того, как появилось числовое программное управление (1950-е годы), для оценки точности станка, оснащенного системой ЧПУ, наряду с указанными выше параметрами геометрической точности стали использовать параметры, оценивающие точность воспроизведения эталонной (заданной) траектории ГОСТ 30544-97 «Методы проверки точности и постоянства обработки круговой траектории». Это интегральный параметр точности станка с ЧПУ очень важен для оценки функциональных возможностей обработки пространственно-сложных поверхностей, т.к. он аккумулирует в себе наряду с указанными выше параметрами геометрической точности также отклонения в траектории, вызываемые силами, действующими в процессе движения (силы трения, силы инерции, силы веса и др.) в соответствии с жесткостными и демпфирующими свойствами несущей системы (НС) станка.

В дальнейшем **под геометрической точностью многокоординатной машины с ЧПУ** будем понимать её точность на «холостом ходу», которая оценивается отклонениями: геометрических параметров, параметров кинематической точности и параметров воспроизведения эталонной траектории.

1.3. Основные факторы, влияющие на точность машины

Всё множество факторов [28], действующих на НС машины и вызывающих относительное смещение точки присоединения инструмента (ТПИ) и точки присоединения приспособления (ТПП), можно разделить на 3 основные группы, имеющие принципиально различную природу:

- 1) Первичные ошибки (отклонения) звеньев механизмов, входящих в НС машины (отклонения изготовления и сборки деталей и узлов машины).
- 2) Силы, действующие на детали и узлы машины.

3) Температура деталей и узлов машины.

Будем считать, что эти группы факторов действуют на НС машины независимо и выполняется принцип суперпозиции, т.е. их действия не связаны между собой, а результаты векторно складываются.

На рис. 1.2. представлены факторы, влияющие на точность машины, и схема их воздействия на относительное смещение исполнительных органов.

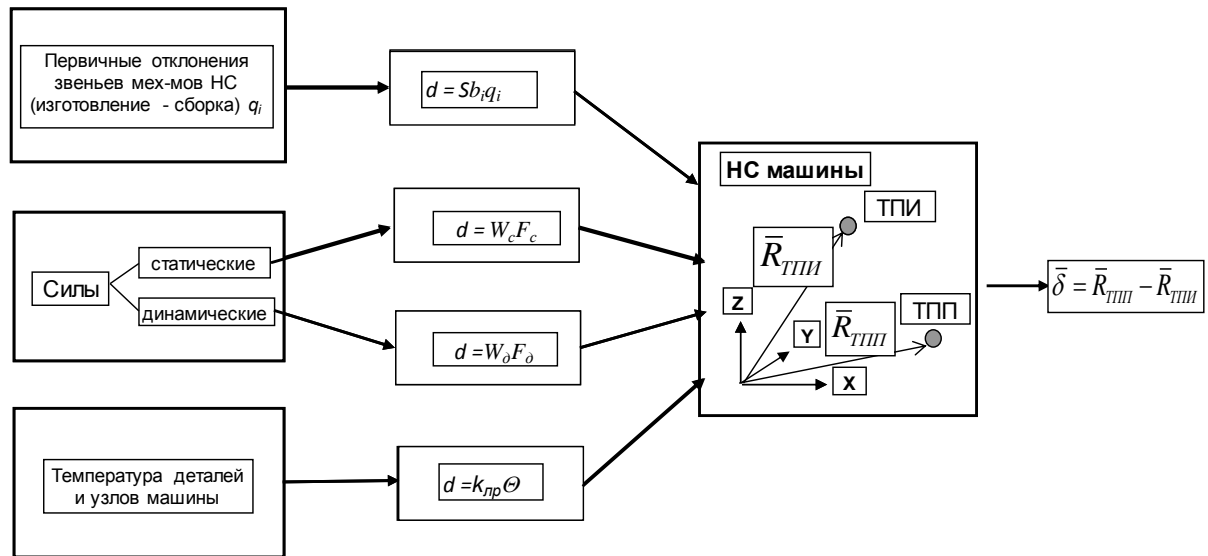


Рис. 1.2. Основные факторы, влияющие на точность машины и механизм их воздействия на относительное смещение исполнительных органов

Здесь: δ - смещение, b_i - коэффициент влияния i -го первичного отклонения Δq_i на отклонение выходного звена, F – силы различной природы (тяжести, рабочих процессов (резание), трения, инерции, электромагнитных процессов и др.), F_c – статические (квазистатические), F_d – динамические, W_{cm} – коэффициент статической податливости, W_d – коэффициент динамической податливости, Θ - температура детали и узлов НС машины, k_{lr} – коэффициент линейного расширения.

Принимая за основу представленную схему механизма воздействия основных факторов на относительное смещение ТПИ и ТПП несущей системы, и учитывая, что машина вносит лишь долю в общее отклонение, определяемое замкнутой системой «исполнительные органы – рабочий процесс», можно выявить логику развития способов и систем повышения точности тра-

ектории ИО многокоординатной машины с ЧПУ. Ниже последовательно рассмотрены основные методы и способы повышения точности обработки на металлорежущих станках, потому что наибольшие достижения в области точности машин достигнуты применительно к станкам.

1.4. Направления повышения точности машины (станка)

Непреложным является тот факт, что при многократном измерении одного и того же отклонения всегда наблюдаются случайная и функциональная её составляющие.

Под случайной и функциональной составляющими отклонения применительно к процессу позиционирования по одной координате понимают следующее.

На рис. 1.3, а) представлены отклонения от заданного положения позиционирования в одной точке Р (при двустороннем подходе), типичные для любого подвижного исполнительного органа машины.

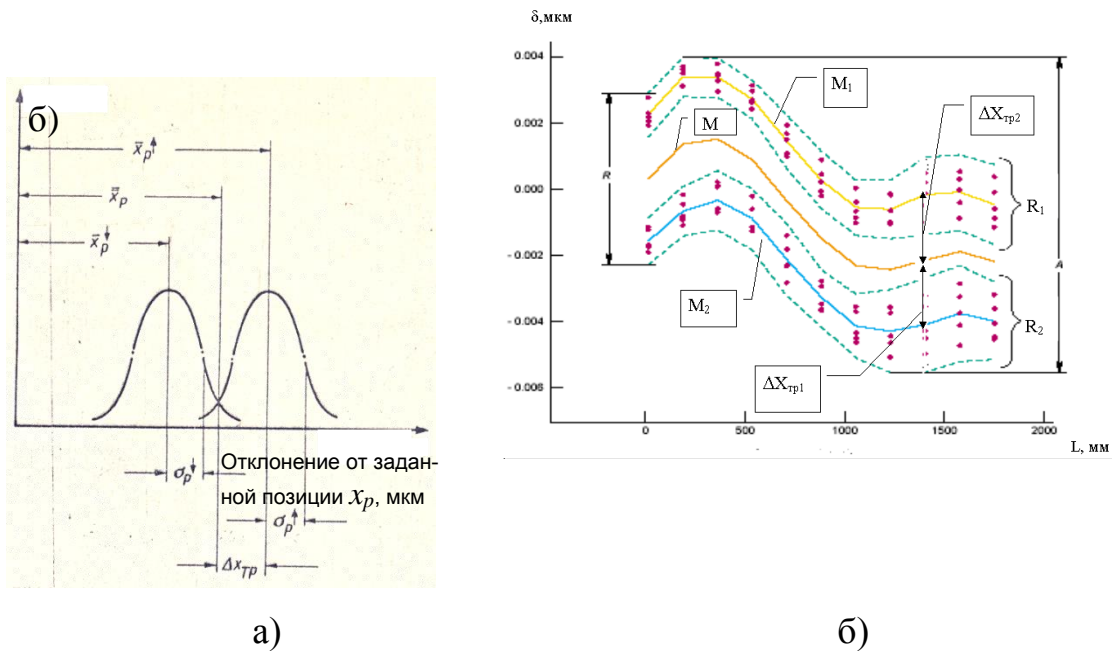


Рис. 1.3. Оценки точности позиционирования (при двустороннем подходе): а) позиционирование в точке Р (отклонение), б) позиционирование на множестве точек, расположенных на отрезке L

Здесь: x_p – отклонение в точке позиционирования Р, \bar{x}_p – среднее математическое ожидание отклонения в точке позиционирования Р, $\bar{x}_p \uparrow$ –

среднее математическое ожидание отклонения в точке позиционирования Р при подходе к точке справа, $\bar{x}_p \downarrow$ - среднее математическое ожидание отклонения в точке позиционирования Р при подходе к точке слева, $\delta_p \uparrow$ - среднее квадратичное отклонение при подходе к точке Р справа, $\delta_p \downarrow$ - среднее квадратичное отклонение при подходе к точке Р слева, $\Delta x_{TP} = \bar{x}_p \uparrow - \bar{x}_p \downarrow$

Если рассматривать отклонения от заданного положения позиционирования на множестве точек исследуемого диапазона L положений (при двустороннем подходе), то мы получаем кривые точности позиционирования (рис. 1.2, б). Такая оценка точности позиционирования соответствует ГОСТ 27843-2006 и ISO-230-2 1997. Здесь: А – общая точность позиционирования, М – общая функциональная составляющая, М₁ - функциональная составляющая при движении в прямом направлении, М₂ - функциональная составляющая при движении в обратном направлении, R₁ – случайная составляющая при движении в прямом направлении, R₂ – случайная составляющая при движении в обратном направлении, R – общая случайная составляющая, ΔX_{TP2} – отклонение обратного хода при движении в обратном направлении, ΔX_{TP1} – отклонение обратного хода при движении в прямом направлении.

Величины \bar{x}_p , $\bar{x}_p \uparrow$, $\bar{x}_p \downarrow$ и кривые М, М₁ и М₂ характеризуют функциональную составляющую отклонения от положения точки позиционирования соответственно в одной точке и на всем диапазоне L. Напротив величины $\delta_p \uparrow$, $\delta_p \downarrow$ и зона R, R₁ и R₂ характеризуют случайную составляющую отклонения от положения точки позиционирования соответственно в одной точке и на всем диапазоне L.

Параметры точности позиционирования характеризуют точностные свойства машины в статике (квазистатическом режиме). Для оценки точности машины в динамическом режиме (при движении исполнительных органов) применяется понятие точности воспроизведения «эталонной траектории», в частности: прямой, окружности, прямого угла и др.

На рис. 1.4, в качестве примера, представлена типичная круглограмма отклонений при воспроизведении эталонной окружности движения корпуса шпинделя относительно рабочего стола станка в плоскости XY.

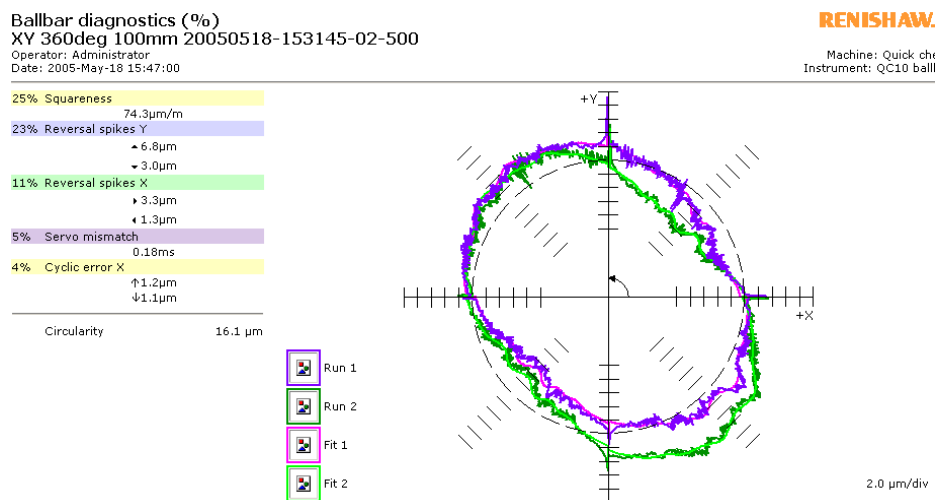


Рис. 1.4. Кривые отклонений воспроизведения эталонной окружности радиуса 100 мм при контурной скорости 500 мм/мин на станке мод. МС 300 в плоскости XY

Отклонения от эталонной окружности существенно зависят от направления её обхода (по часовой или против часовой стрелки). Отличие в отклонениях объясняется различной реакцией несущей системы машины на различное направление сил инерции и сил трения.

Отклонения от эталонной окружности также имеют функциональную и случайную составляющую.

Конструкторы, а также исследователи, инженеры, механики на протяжении всей истории создания машин постоянно работали над повышением их точности, уменьшая случайную и функциональную составляющие. Методы воздействия на случайную и функциональную составляющие существенно различались.

На рис. 1.5 представлены направления повышения точности многокоординатной машины с ЧПУ [91, 96] на примере станка с ЧПУ.

Все направления можно разбить на две большие группы:

1) совершенствование конструкции НС машины (станка) и технологии её изготовления,

2) совершенствование процесса управления машиной (станком) методами коррекции.

1.4.1. Направления, связанные с совершенствованием конструкции НС машины и технологии её изготовления

Совершенствование конструкции машины (станка) с целью повышения её точностных характеристик осуществляется решением, в основном, 4 задач:

- уменьшение первичных отклонений в используемых механизмах (совершенствование конструкции и улучшение технологии изготовления),
- уменьшение влияния на точность различных сил (трения, сил рабочего процесса (резания), инерционных, тяжести и др.),
- увеличение статической и динамической жесткости НС станка,
- стабилизация и уменьшение температурных деформаций [117].

Эти направления являются традиционными. Они всегда были привлекательны для создателей станков, их результаты проявляются сразу и непосредственно при любых условиях в конечном результате повышения точности станка.

На практике они реализуются в виде традиционных направлений совершенствования машин:

Создание новых схем построения машины на основе:

- новых технологий и принципов формообразования [124],
- применения новых механизмов, в частности, механизмов параллельной структуры [50], и особенно механизмов с избыточными связями.

Создание новых конструкций машины на основе:

- новых методов расчета и проектирования,
- новых современных материалов,
- новых комплектующих,

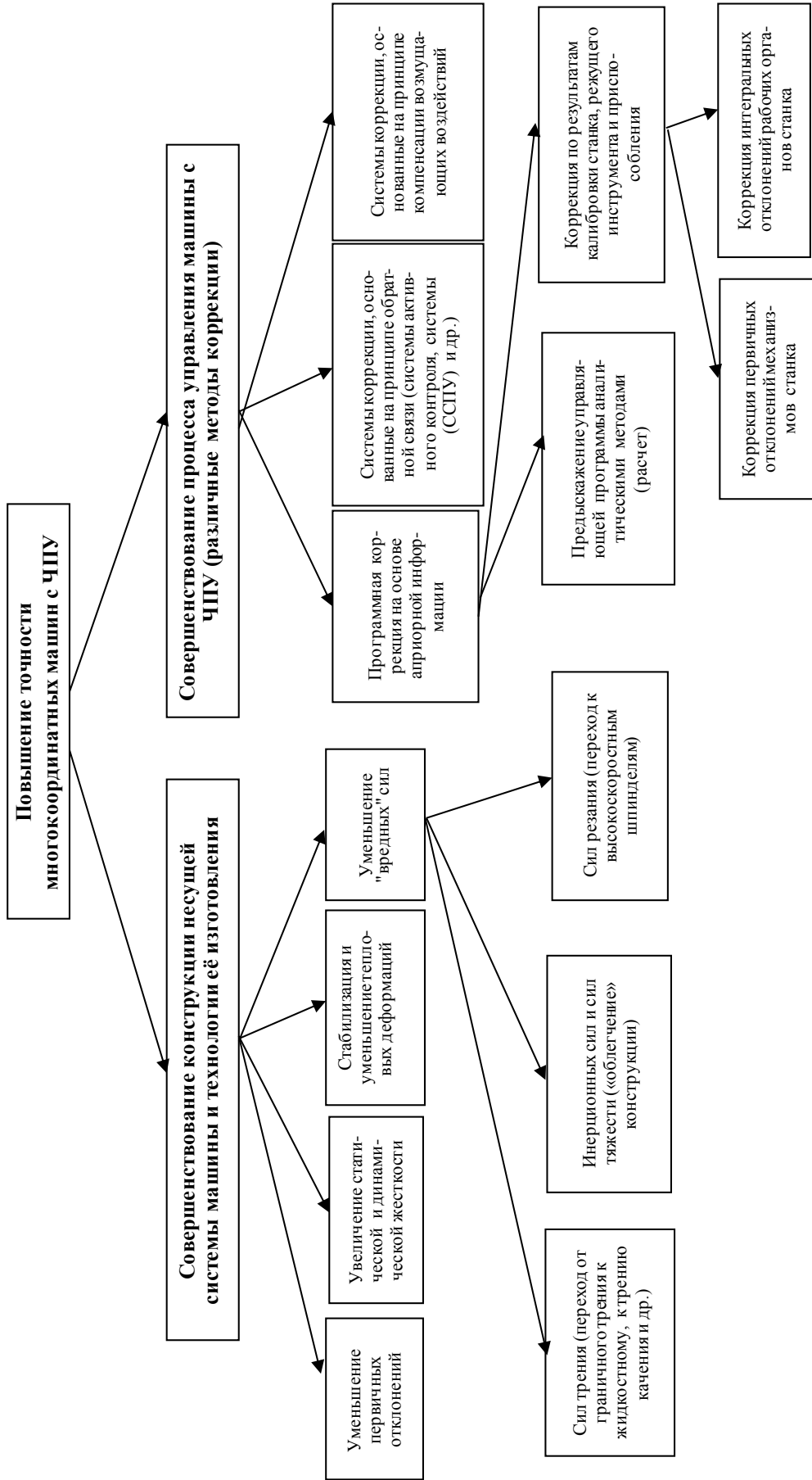


Рис. 1.5. Направления повышения точности многокоординатной машины (станка) с ЧПУ

- новых принципов соединения деталей (переход от зазоров к натягам в подвижных соединениях),
- новых конструктивных форм деталей и узлов.

В тех случаях, когда не удастся достигнуть требуемого уровня точностных показателей станка указанными методами и средствами, или это достижение связано с большими затратами, привлекают всевозможные системы коррекции, так или иначе связанные с совершенствованием процесса управления станком. Это в ряде случаев оказывается проще и эффективнее, чем следование традиционным подходам. Между этими направлениями постоянно идёт конкуренция и взаимопроникновение. В последнее десятилетие при создании прецизионных машин методам коррекции уделяется всё возрастающее значение.

Под цифровой коррекцией в дальнейшем будем понимать корректирующие воздействия на движение исполнительных органов машины с помощью системы ЧПУ на основе информации о статических и динамических свойствах несущей системы и о действующих на неё возмущениях.

1.4.2. Направления, связанные с совершенствованием процесса управления машиной методами коррекции

Системы коррекции развивались в соответствии с уровнем развития науки и техники, начиная с механических корректирующих устройств (всевозможные корректирующие линейки). Особенно это направление стало бурно развиваться с началом развития средств вычислительной (процессорной) техники и числового программного управления. В работе [36, 87] приведена классификация систем управления станками по информационным признакам, а именно, по источникам информации и принципам управления.

Системы коррекции, применяемые в машинах, можно подразделить на три группы в соответствии с основными принципами управления [119]:

- системы коррекции, основанные на принципе программной коррекции (разомкнутые системы),

- системы коррекции, основанные на принципе обратной связи (замкнутые системы),
- системы коррекции, основанные на управлении по возмущению (компенсация возмущений, разомкнутые системы).

1.4.2.1. Программная коррекция на основе априорной информации.

Эти системы основываются на использовании информации, полученной до начала осуществления обработки детали на станке. Они подразделяются на две подгруппы:

- предсказание управляющей программы аналитическими методами (расчет),
- коррекция по результатам калибровки станка.

1.4.2.1.1. Предсказание управляющей программы аналитическими методами

Блок-схема системы коррекции, построенной по указанному способу, представлена на рис. 1.6.

Программу управления рассчитывают с учетом суммарной погрешности обработки, определяемой на основе расчетов, исходными данными для которых являются жесткость системы СПИД, статические и динамические свойства несущей системы станка, характеристики износа инструмента, режимы резания, обрабатываемый материал и др.

Этот способ первоначально использовался для компенсации динамических ошибок в следящих приводах станков с ЧПУ и описан в работах [2, 4]. Потом его использовали для коррекции погрешности обработки деталей [27, 74-75]. Однако, в дальнейшем этот способ не получил развития. С целью уменьшения вредного влияния динамических ошибок на точность станка создатели станков пошли путем совершенствования станка, именно, приводов и способов их настройки, а коррекция деформаций системы СПИД и износа инструмента требует достоверных дорогостоящих баз данных для каждого данного экземпляра станка, режущего инструмента, приспособления и материала обрабатываемой детали и др.

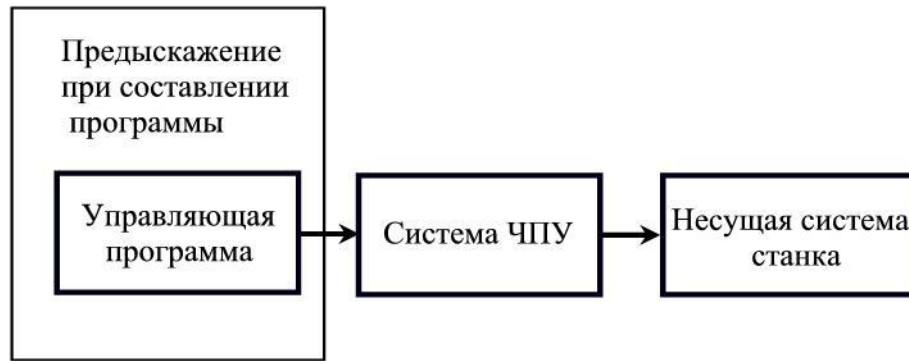


Рис. 1.6. Блок-схема системы коррекции, основанной на предсказании управляющей программы

Со временем этот способ трансформировался в способ коррекции по результатам калибровки станка, режущего инструмента, приспособления. Он получил дальнейшее развитие путем коррекции люфтов, кинематических погрешностей и других первичных отклонений (прямолинейности направляющих, прогибов траверс) не через коррекцию управляющей программы, а системами коррекции, встроенными в программное обеспечение систем ЧПУ, которым уделено основное внимание в данной работе.

1.4.2.1.2. Коррекция по результатам калибровки станка, режущего инструмента и приспособления.

Здесь сформировались следующие направления:

1) Коррекция, основанная на измерении первичных отклонений механизмов НС станка и расчётов в соответствии с имитационной моделью образования интегральных отклонений исполнительных органов станка.

2) Коррекция, основанная на измерении интегральных отклонений позиционирования ИО машины в функции координат (X, Y, Z) в рабочем пространстве, запоминании массива данных и компенсации при отработке траектории движения.

3) Коррекция, основанная на измерении интегральных отклонений позиционирования ИО машины в функции координат (X, Y, Z) в рабочем пространстве и изменении параметров кинематической модели многокоординатной машины с ЧПУ.

4) Коррекция на размер режущего инструмента и коррекция на положение обрабатываемой детали.

На рис. 1.7 показана блок-схема системы коррекции по результатам калибровки станка, режущего инструмента и приспособления.

1. Коррекция, основанная на измерении первичных отклонений механизмов НС станка и расчётов в соответствии с имитационной моделью образования интегральных отклонений исполнительных органов станка.

Задолго до появления программного управления получила широкое применение коррекция шага винта в резьбошлифовальных станках. Корректирующая линейка в своем профиле «несет» поправку к шагу ходового винта. Корректирующая поправка суммируется с шагом ходового винта через дифференциальный механизм винтовой пары (доворачивается гайка в корпусе каретки, несущей шлифовальный круг), например, в универсальном резьбошлифовальном станке мод. 5K822В. Точная настройка станка на шаг резьбы осуществляется разворотом коррекционной линейки.

Конструкция корректирующей линейки приводится в [8].



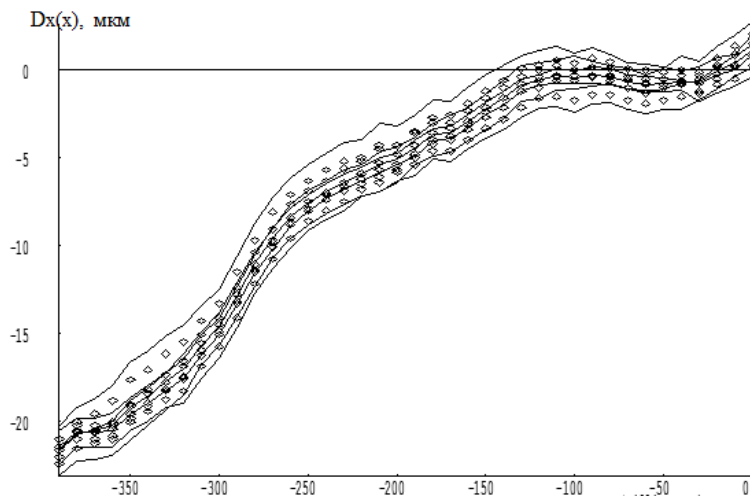
Рис. 1.7. блок-схема системы коррекции по результатам калибровки станка, инструмента и приспособления, установленного на станке

В современных системах ЧПУ станками обязательно присутствует коррекция шага винта по всем управляемым координатам и компенсация люфта. Коррекция шага винта и компенсация люфта проводится по результа-

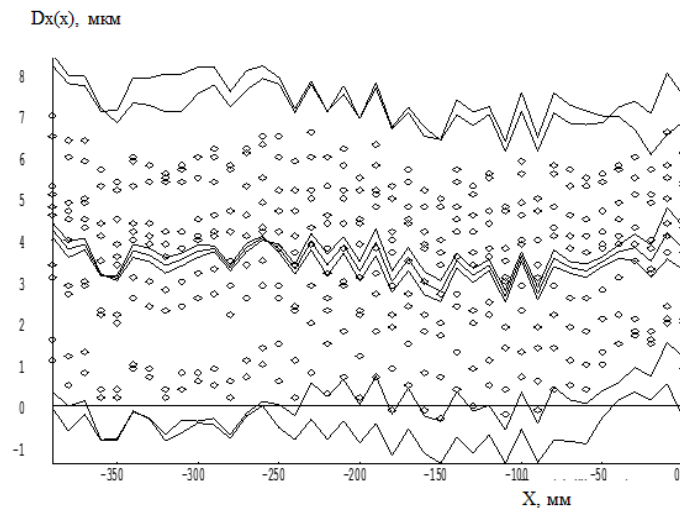
там измерения точности позиционирования и направлена на компенсацию функциональной составляющей отклонения позиционирования.

Так в опытном станке мод. МС 300 (ОАО НИАТ), оснащенного системой 840 D фирмы Siemens AG (Германия), была проведена коррекция, которая позволила существенно увеличить точность позиционирования по всем управляемым координатам.

На рис. 1.8, а) представлены результаты (3 прогона в прямом и обратном направлении) измерения точности позиционирования салазок (координата



а)



б)

Рис. 1.8. Повышение точности позиционирования методом коррекции по точкам: а) кривые точности позиционирования без коррекции, б) кривые точности позиционирования с введением коррекции

та X). Точность позиционирования без коррекции составляет: 1) Отклонение двустороннего позиционирования $A = 25.9$ мкм, 2) Отклонение обратного хода $B_{max} = 1.2$ мкм, 3) Случайная составляющая $R\uparrow = 3.2$ мкм, $R\downarrow = 4.4$ мкм. Большая величина функциональной составляющей (Mean Dev.) $M = 22.8$ мкм говорит о необходимости проведения коррекции отклонений позиционирования по координате X .

На рис. 1.8, б) представлены кривые точности позиционирования по координате X после введения коррекции. Отклонения при позиционировании существенно уменьшились: 1) $A = 9.9$ мкм, 2) $B_{max} = 1.2$ мкм, 3) $R\uparrow = 8.1$ мкм, $R\downarrow = 8.8$ мкм.

Развитию этого направления повышения точности многокоординатных машин с ЧПУ посвящено большое число исследований. В [155, 184, 178] представлен обзор работ, выполненных в данном направлении. В работе [170] представлены результаты экспериментальных исследований повышения точности обработки методами программной цифровой коррекции (уменьшение погрешности обработки с 16 мкм до < 5 мкм).

Фирмы, изготавливающие системы ЧПУ для станков, интенсивно ведут работы по расширению функциональных возможностей коррекции по результатам измерения первичных отклонений и расчётам в соответствии с имитационной моделью.

2. Коррекция, основанная на измерении интегральных отклонений позиционирования ИО машины в функции координат (X, Y, Z) в рабочем пространстве, запоминании массива данных и компенсации при отработке траектории движения.

Этот вид коррекции получил первоначально развитие применительно к координатным измерительным машинам (КИМ) [147, 48], а в дальнейшем, применительно к станкам с ЧПУ [133, 135, 137, 146, 193].

Особенностью данного вида коррекции является то, что отклонения позиционирования измеряются на исполнительном органе машины или станка в функции координат рабочего пространства. Вследствие этого коррекция

осуществляется значительно полнее, т.к. не требуется соблюдения принципа суперпозиции. Указанная особенность коррекции интегральных отклонений является её преимуществом. Недостатком указанного вида коррекции является её преимуществом. Недостатком указанного вида коррекции является большая трудоёмкость проведения измерений (большой объем измерений), а также необходимость разработки оригинальных систем коррекции для конкретных конструкций станков со стандартными системами управления. Последнее, не является чем-то особенным для производителей КИМ. Они оснащают свои измерительные машины, как правило, системами управления собственной разработки или сделанными на заказ. В отношении большой трудоёмкости проведения измерений можно отметить, что в настоящее время достигнуты большие успехи в автоматизации измерений (см. Главы IV и V).

Блок-схема системы коррекции интегральных отклонений рабочих органов КИМ или станка та же самая, что и для системы коррекции первичных отклонений (рис. 1.7). Вместо файла первичных отклонений создается файл отклонений исполнительных органов машины и соответствующие алгоритмы выполнения коррекции.

В рабочем пространстве КИМ [147] (рис. 1.9, а) строится сетка точек (рис. 1.9, б), в которых измеряются отклонения позиционирования при двухстороннем подходе: Δx , Δy , Δz - отклонения, соответствующие присоединительной точке измерительной головки и 3-х угловых поворотов φ_x , φ_y , φ_z измерительной головки.

При измерении детали к управляющим сигналам, поступающим к приводам, к номинальным значениям координат точек позиционирования добавляются корректирующие поправки, рассчитываемые в соответствии с измеренными отклонениями (Δx , Δy , Δz , φ_x , φ_y , φ_z) и конфигурацией измерительного наконечника.

Следует отметить, что коррекция по результатам измерения исполнительных органов машины является альтернативой для коррекции по резуль-

татам измерения первичных отклонений, которая в настоящее время является лидирующей по применению для станков с ЧПУ.

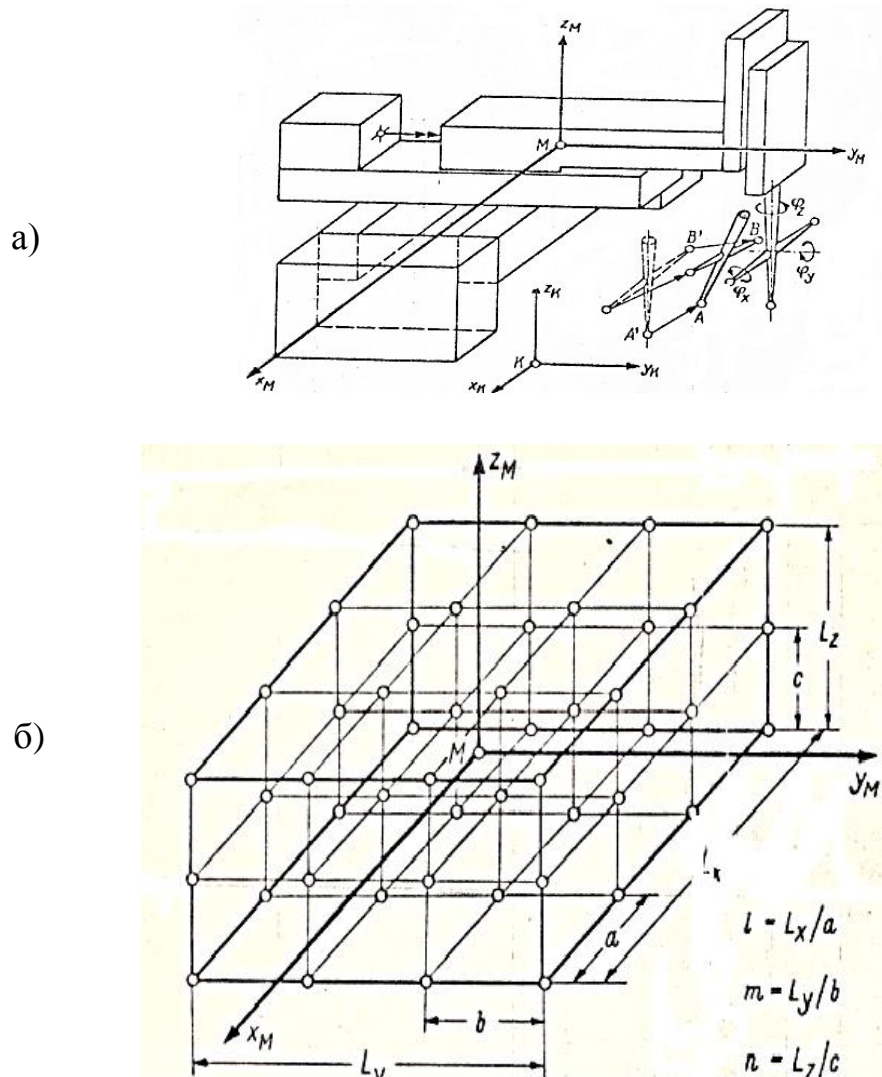


Рис. 1.9. 3-х координатная КИМ: а) принципиальная схема КИМ, б) сетка точек, в которых осуществляются измерения отклонений позиционирования (Δx , Δy , Δz , φ_x , φ_y , φ_z)

3. Коррекция, основанная на измерениях интегральных отклонений механизмов НС станка и изменении параметров кинематической модели многокоординатной машины с ЧПУ.

Этот вид коррекции зародился и получил развитие применительно к антропоморфным роботам с поворотными звеньями. В его основу положена кинематическая модель, предложенная Denavit and Hartenberg (D-H) [142] и базирующаяся на последовательных однородных преобразованиях. В работах

[12, 49] рассмотрены методы повышения точности аналитически программируемых промышленных роботов на основе анализа и коррекции их моделей, а в работе [81] рассмотрены вопросы повышения точности обработки деталей сложной формы путем определения оптимальных параметров кинематической модели металлорежущего станка. Коррекция моделей осуществляется посредством изменения её параметров на основе информации как об отклонениях траектории движения ИО робота, так и об отклонениях отдельных его звеньев и узлов [156, 150, 179]. В работе [165] описана методика коррекции интегральных отклонений для координатной измерительной машины антропоморфной конструкции FaroArm [149] (рис. 1.10, а) посредством изменения параметров кинематической модели.

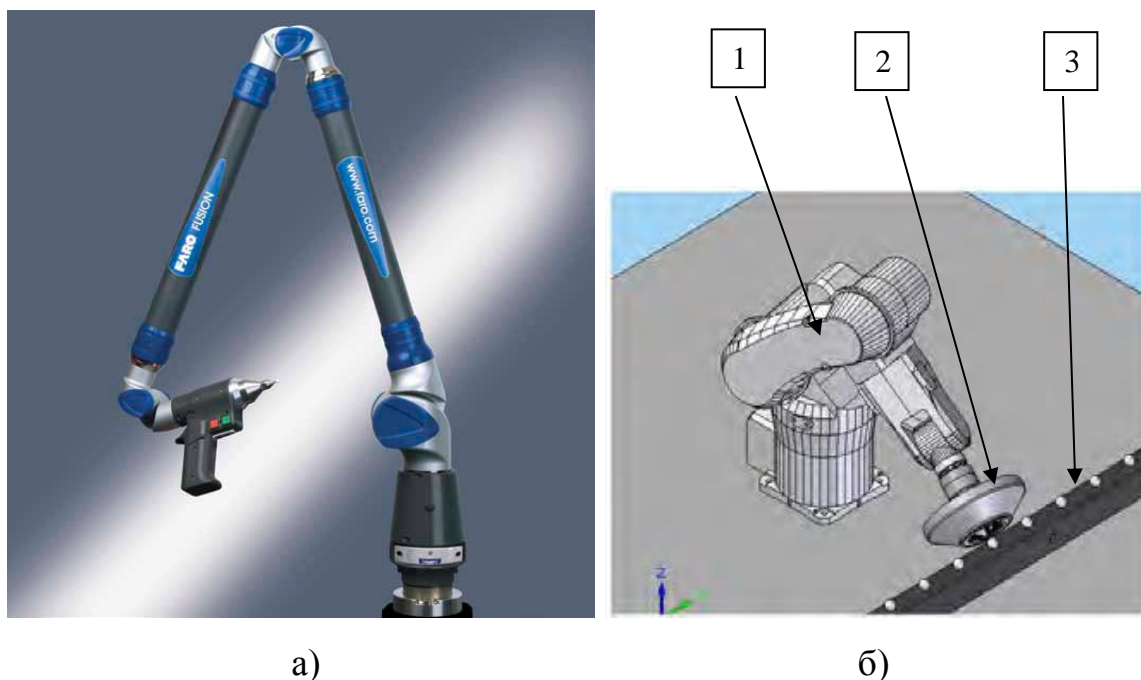


Рис. 1.10. а) общий вид переносной КИМ антропоморфной конструкции с 6 степенями подвижности, б) процедура измерения отклонений позиционирования для антропоморфного робота: 1- робот, 2 - измерительная головка, 3 - калибровочная линейка с образцовыми шарами

Кинематическая модель $\mathbf{L} = \mathbf{F}(\mathbf{P}, \mathbf{W})$ положена в основу управления КИМ (\mathbf{L} – вектор обобщенных координат, \mathbf{P} – вектор параметров (4 параметра на каждое звено i : $\alpha_i, a_i, \theta_i, d_i$), \mathbf{W} – вектор номинальных декартовых координат выходного звена). Для кинематической модели КИМ FaroArm число

параметров равно 27. Поиск оптимальных параметров **P** осуществляется посредством итерационной процедуры по критерию минимума суммы средне-квадратичных отклонений позиционирования ИО КИМ во всем рабочем объеме.

Отклонения позиционирования с помощью описанной процедуры коррекции удаётся существенно уменьшить и довести допускаемое отклонение позиционирования в пространстве для FAROARM (размер 1,8 м; 6 степеней подвижности) Platinum до $\pm 0,029$ мм.

Данное направление интенсивно развивается.

4. Коррекция размера режущего инструмента и коррекция начального положения обрабатываемой детали.

Что касается коррекции на размер режущего инструмента, то этот вид коррекции развивался с самых первых систем ЧПУ. Например, в фазоимпульсной системе ЧПУ мод. ФС- 2К (СССР, 70-е годы прошлого столетия) с управляющей программой на магнитной ленте была предусмотрена коррекция на радиус фрезы. Коррекция вводилась непосредственно на пульте управления системы ЧПУ по результатам измерения действительного размера фрезы.

В каждой современной системе ЧПУ имеются команды, через которые по результатам измерения действительного положения приспособления на столе станка и размеров режущего инструмента осуществляется привязка к исходным «нулевым» позициям станка и коррекция на радиус и длину инструмента.

1.4.2.2. Системы коррекции, основанные на принципе обратной связи (замкнутые системы)

Идеи использования информации о состоянии процесса обработки, получаемой от системы СПИД, для цели повышения точности обработки нашли применение в машиностроении сравнительно давно.

При обработке детали станок является звеном замкнутой системы СПИД. Размер обрабатываемой детали является «слепок» - следствием дей-

ствия всех возмущающих факторов в системе СПИД. Если в процессе обработки детали удастся получать информацию об отклонениях размера обрабатываемой детали, то для повышения точности обработки может использоваться система коррекции, основанная на принципе обратной связи.

В токарных и шлифовальных станках во многих случаях оказывается возможным установить непосредственно в зоне резания датчик, измеряющий обрабатываемую деталь. Большинство этих систем получило название систем активного контроля. В этих системах измеряемая величина и управляющий сигнал имеют одинаковую размерность.

На рис. 1.11 представлена укрупненная блок-схема системы активного контроля на станке с ЧПУ.

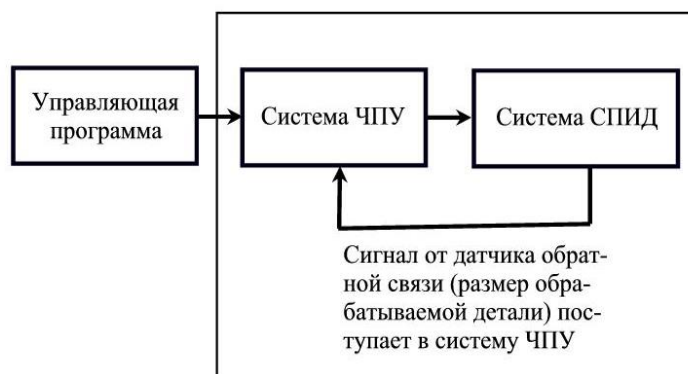


Рис.1.11. Блок-схема системы активного контроля на станке с ЧПУ

Системы активного контроля хорошо себя зарекомендовали в серийном, крупносерийном и массовом производстве [24]. Основная трудность данного способа заключается в создании универсального измерительного устройства, встраиваемого в станок и работающего в зоне резания.

Намного проще измерить уже изготовленную деталь на КИМ и осуществить коррекцию управляющей программы для обработки следующих деталей партии.

Такой подход был предложен в работах [37,13]. Системы коррекции, реализующие этот подход, получили название самонастраивающихся систем программного управления и были развиты в работах [39-43,71,84-86,107-109]. На рис. 1.12 представлена блок-схема системы коррекции, реализую-

щей принцип самонастройки, заключающийся в использовании информации о реальных свойствах системы СПИД, отраженных на обработанной поверхности детали. Эта информация используется для выработки усовершенствованной программы обработки последующих деталей этой же партии.

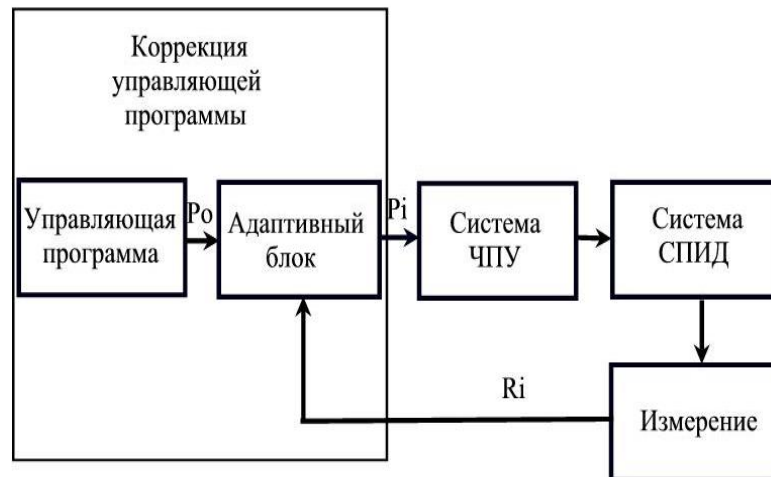


Рис. 1.12. Система коррекции управляющей программы, реализующая принцип самонастройки: P_0 – исходная управляющая программа, P_i – скорректированная управляющая программа для i - детали ($P_1 = P_0$), R_i – отклонения обработанной поверхности от заданной

Однако при автоматизации указанной процедуры самонастройки на практике в машиностроении встретились существенные трудности (выбор точек измерения и алгоритм коррекции во многом определяется спецификой обрабатываемой детали и технологического процесса). Следует отметить, что в ручном режиме указанные трудности в каждом конкретном случае преодолеваются, и указанная схема коррекции управляющей программы по результатам измерения первой детали широко применяется при обработке сложных деталей на станках с ЧПУ. Существенным недостатком данного способа коррекции является необходимость осуществлять пробную обработку детали (первая деталь партии).

Распространению указанного вида коррекции способствует оснащение машиностроительного производства КИМ, способными работать в цеховых

условиях. Такие КИМ выпускает фирма Zeisse AG. Например, КИМ мод. CenterMax [140].

1.4.2.3. Системы коррекции, основанные на принципе компенсации возмущающих воздействий (управление по возмущению)

Рассматриваемый принцип управления впервые был предложен в 1830 г. французским инженером Ж. Понселе при разработке теории центробежных регуляторов хода машин по нагрузке на валу машины. Но реализовать свое предложение на практике инженеру Ж. Понселе не удалось, так как динамические свойства машины не допускали непосредственного использования принципа компенсации.

В 1940 г. был предложен принцип инвариантности - достижение независимости управляемой координаты от возмущений. Практическая реализация была осуществлена только в 50-е годы.

Существуют технологические процессы, в которых на точность обработки преимущественно влияют один – два возмущения при стабильной функциональной зависимости «возмущение – отклонение». Теории и практике применения таких систем коррекции в станках посвящено большое число работ, обобщённых в [1]. В таких случаях, измеряя возмущение и зная функциональную зависимость «отклонение - возмущение», можно вычислить корректирующие поправки и внести в систему ЧПУ. На рис. 1.13 представлена блок-схема системы коррекции, построенной по принципу управления по возмущению.

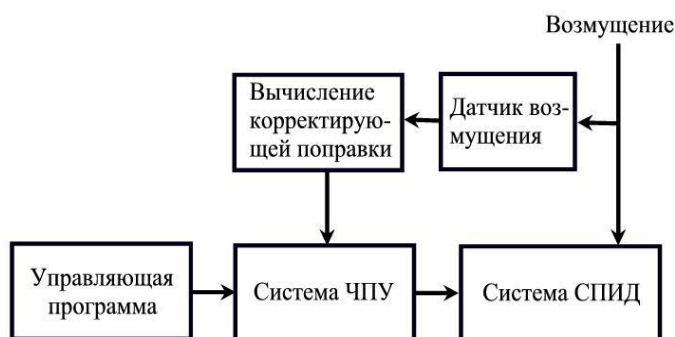


Рис. 1.13. Блок-схема системы коррекции, построенной по принципу управления по возмущению

В настоящее время продолжается создание систем управления по возмущению [151, 153, 169, 196-197]. Так, например, в [169] описана оптическая система, установленная на станке для измерения диаметра проволоки и соответственно её износа с целью коррекции траектории движения исполнительного органа в проволочном электроэрозионном вырезном станке (обработка миниатюрных отверстий в инжекторах).

Естественно создаются комбинированные системы коррекции, построенные на сочетании управления по различным принципам: программная коррекция, коррекция по отклонению, коррекция по возмущению.

Вывод.

Проведённый анализ направлений повышения точности многокоординатных машин с ЧПУ показал, что наибольший эффект повышения точности достигается сочетанием направлений. Совершенствование конструкции и технологии изготовления машины должно быть направлено на уменьшение и/или перевод случайной составляющей в систематическую (функциональную) составляющую, которая далее компенсируется системами цифровой коррекции.

Программная коррекция является эффективным направлением повышения геометрической точности многокоординатной машины. Высокая геометрическая точность многокоординатной машины с ЧПУ является базовым (необходимым) условием достижения высокой точности её работы и является предпосылкой получения готовой детали без проведения пробной обработки. Достаточными условиями являются: «мягкие» режимы резания (чистовая операция) или наращивание программной коррекции другими видами цифровой коррекции (адаптивными системами управления по силе резания, температуре или др. возмущениям).

1.4.3. Способы цифровой коррекции отклонений взаимного положения ИО многокоординатной машины с ЧПУ

Проведённый анализ в настоящей главе показал, что коррекция первичных и интегральных отклонений взаимного положения исполнительных

органов многокоординатной машины может осуществляться четырьмя способами [96] (рис. 1.14).

1. Полная коррекция всех (41) первичных отклонений с вычислением и отработкой приводами корректирующих линейных $\Delta_{\Sigma x}$, $\Delta_{\Sigma y}$, $\Delta_{\Sigma z}$ и угловых $\Delta_{\Sigma A}$, $\Delta_{\Sigma B}$, $\Delta_{\Sigma C}$ поправок. (Глава II и III настоящей работы посвящены развитию этого способа).

2. Коррекция части (14) первичных отклонений механизмов 5 координатных машин последовательной структуры квазипараллельными вычислительными процессами. Способ реализован в современных системах ЧПУ, например, Sinumerik 840 D[187].

3. Коррекция по результатам измерения интегральных отклонений взаимного положения ИО многокоординатной координатной машины с ЧПУ в функции координат рабочего пространства. Способ связан с получением, обработкой и хранением большого объёма информации и с разработкой специальных систем коррекции. Способ применяется в КИМ.

4. Внесение коррекции через изменение параметров кинематической модели $L_n = F(P_n, W_n)$, положенной в основу управления машиной (L_n – вектор обобщенных координат многокоординатной машины, P_n – вектор параметров, W_n – вектор номинальных декартовых координат выходного звена n – номер итерации). Способ применяется в многокоординатных машинах с ЧПУ со сложной структурой с различными кинематическими парами, включая сферические.

Настоящая работа направлена на разработку методов и средств анализа и синтеза точности движения исполнительных органов многокоординатной машины с ЧПУ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Провести анализ первичных отклонений механизмов с поступательными и вращательными парами на примере НС последовательной структуры станка мод. МС – 300 и разработать схемы и методики их измерений.

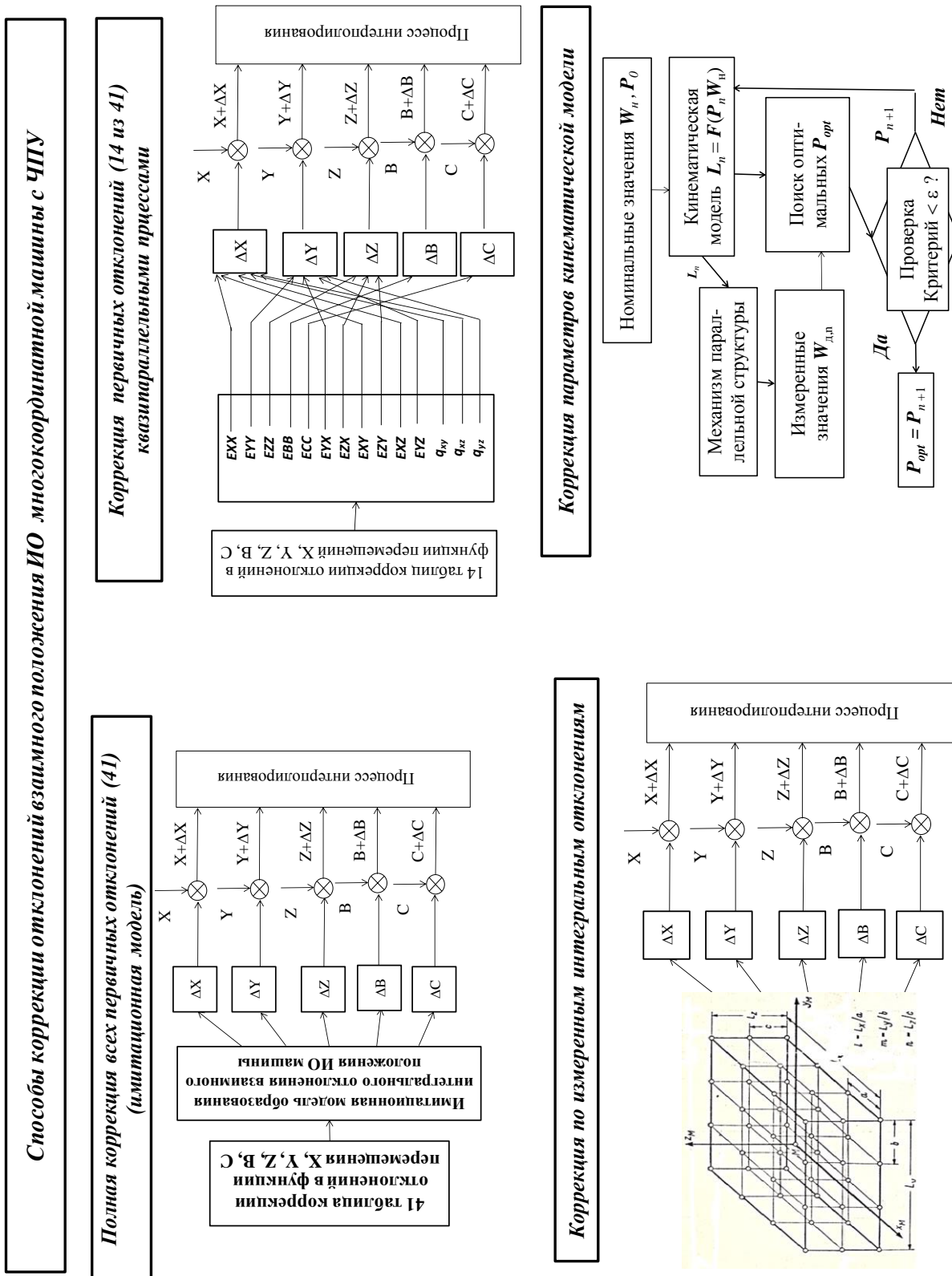


Рис. 1.14. Способы цифровой коррекции отклонений взаимного положения ИО многокоординатной машины с ЧПУ

2. Разработать математическую и имитационную модели образования интегральных отклонений ИО многокоординатной машины с ЧПУ.

3. Разработать методику анализа точности многокоординатной машины с ЧПУ методом имитационного моделирования и провести исследование баланса точности конкретного станка мод. МС – 300.

4. Синтезировать алгоритм поиска поправок для модифицированного способа коррекции квазипараллельными вычислительными процессами.

5. Систематизировать и провести анализ эффективности методов и средств измерений первичных и интегральных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ.

6. Разработать метод и создать универсальное приспособление для измерения отклонений пересечения осей вращения в многокоординатных машинах с ЧПУ.

7. Развить способ оценки объёмной точности станка, основанный на измерении «следа» действительной траектории на обработанной поверхности на примере исследования точности станка параллельной структуры (Гексамех-1).

8. Исследовать влияния квазистатических возмущающих факторов (веса, температуры) на первичные отклонения механизмов многокоординатной машины с ЧПУ с целью применения цифровой коррекции.

9. Создать методику исследования влияния инерционных сил на точность воспроизведения пространственной траектории ИО многокоординатной машины с целью повышения динамических свойств НС.

10. Разработать алгоритм калибровки и диагностики точности многокоординатной машины при её сборке.

ГЛАВА II. ПЕРВИЧНЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ ЗВЕНЬЕВ МЕХАНИЗМОВ С ПОСТУПАТЕЛЬНЫМИ И ВРАЩАТЕЛЬНЫМИ ПАРАМИ И ПРАВИЛО ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

2.1. Введение

Как показано в главе I, одним из основных факторов, действующих на несущую систему (НС) станка и вызывающих отклонение выходного звена в механизмах машины, являются первичные отклонения звеньев механизмов (отклонения изготовления и сборки машины).

В настоящей главе определены первичные отклонения звеньев, входящих в поступательные и вращательные кинематические пары, в понятиях норм точности станков. Уточнено понятие несущей системы (НС) машины (станка) и предложена стратегия разбивки НС машины на подсистемы с одной кинематической парой, что является основой для создания математической модели отклонения взаимного положения выходных звеньев многокоординатной машины.

2.2. Основные понятия теории точности механизмов применительно к механизмам несущей системы машины с ЧПУ

При создании модели будем пользоваться понятиями механики [5,50,52,83,118], а в качестве исходных данных о «первичных» отклонениях параметров механизмов позиционирования будем использовать результаты измерения параметров точности реальной машины, в которых отражаются также и его жесткостные и тепловые свойства. Такой подход позволяет в модели, построенной в понятиях «твёрдой» механики, учитывать наряду с отклонениями (размеров, формы, расположения) изготовления соединительных поверхностей деталей и узлов также жесткостные (деформации) и тепловые свойства машины.

В работе [118] твердое тело определяется как «... система бесконечно-го множества материальных точек, заполняющих сплошным образом некоторую часть пространства и связанных между собою, так называемыми связями

твердости, заставляющими оставаться неизменным расстояние между двумя любыми точками системы при их движении».

Там же дается следующее определение твердого тела: «под твердым телом мы разумеем неизменяемую сплошную систему материальных точек, т.е. такую систему, которая а) сплошным образом заполняет некоторый объём пространства и в которой б) расстояние между двумя любыми точками остаётся неизменным, какие бы силы ни прилагались к системе и каким бы перемещениям она ни подвергалась. Такого рода система материальных точек называется также идеально твердым или абсолютно твердым телом, в отличие от физических твердых тел, не обладающих идеальной твердостью».

Наряду с этим для построения искомой модели будем пользоваться понятиями и основными положениями теории точности механизмов [14, 15, 47, 57, 65, 126].

«Теория точности механизмов изучает причины ошибок механизмов, анализирует влияние этих причин на точность механизмов, разрабатывает и исследует методы расчета на точность и методы повышения точности механизмов».

Рассмотрим основные понятия теории точности механизмов, которые потребуются ниже:

- идеальный механизм,
- первичные ошибки механизма,
- ошибки положения ведомого (в смысле «выходного») звена механизма,
- ошибки перемещения ведомого звена механизма.

Вместо термина «ошибка» будем ниже пользоваться термином «отклонение». Этот термин более полно отражает природу величины – дополнительного (малого) линейного и углового перемещения звена в пространстве.

Идеальный механизм – это такой механизм, который мог бы воспроизвести заданную зависимость координаты ведомого звена от координат ведущих звеньев с абсолютной точностью (отклонения равны нулю). Практиче-

ски идеальный механизм осуществить нельзя. Тем не менее, при исследовании точности существующих (реализованных) механизмов понятие идеального механизма является важным, т. к. идеальный механизм представляет собой тот предел, к которому приближаются действительно существующие механизмы при непрерывном повышении их точности изготовления. (Точность механизма выступает как оценка степени приближения реального механизма к идеальному).

Всякий действительно существующий механизм, предназначенный для реализации заданной зависимости координаты ведомого звена от координат ведущих звеньев, будем называть реальным механизмом.

Первичные отклонения (ошибки) механизма.

Механизм имеет одно ведомое и несколько ведущих звеньев (не менее 1), связанных с ведомым звеном с помощью промежуточных звеньев. Каждое звено механизма содержит кинематические пары, с помощью которых оно соединяется с соседними звеньями.

На рис. 2.1 [5,52] представлены все встречающиеся кинематические пары:

- поступательная пара (*ползун*) – 1 ст. свободы,
- вращательная пара (*шарнир*) – 1 ст. свободы,
- винтовая пара – 1 ст. свободы,
- цилиндрическая пара (цилиндрический шарнир) – 2 ст. свободы,
- сферическая пара с пальцем (кардан) – 2 ст. свободы,
- сферическая пара (*шаровой шарнир*) – 3 ст. свободы,
- плоскостная пара – 3 ст. свободы,
- цилиндр-плоскость - 4 ст. свободы,
- шар – плоскость – 5 ст. свободы.

В реальном звене механизма кинематическая пара реализуется с помощью сопрягающихся поверхностей деталей, образующих кинематическую пару. Деталь – это часть пространства, заполненная материалом и ограниченная поверхностями.

Число степеней свободы	Число уравнений геометрических связей	Название пары	Рисунок	Условное обозначение
1	5	Поступательная		
1	5	Вращательная		
1	5	Винтовая		
2	4	Цилиндрическая		
2	4	Сферическая с пальцем		
3	3	Сферическая		
3	3	Плоскостная		
4	2	Цилиндр — плоскость		
5	1	Шар — плоскость		

Рис. 2.1. Кинематические пары

По аналогии с реальным и идеальным механизмом можно говорить о реальной и идеальной деталях. Поверхности изготовленной (реальной) детали будут расположены иначе, чем в идеальной детали, и их форма и размеры

также будут отличаться от идеальных. Соприкосновение сопрягаемых поверхностей в реальной кинематической паре может происходить с зазором или натягом. В механизмах с кинематическими парами качения возможно проскальзывание ведомых звеньев пар качения относительно ведущих. Все это в совокупности приводит к первичным отклонениям параметров механизма, которые могут рассматриваться как свойства реального механизма.

Однако особенно следует отметить, что в реальной детали на её размеры, форму и расположение поверхностей оказывает её вес и схема её присоединения к другой сопрягаемой детали. Особенно это проявляется уже в собранном узле или всей машине.

Отклонения положения, размеров и формы реального элемента кинематической пары в теле звена от положения, размеров и формы идеального элемента, а также проскальзывания в парах качения будем называть первичными отклонениями (ошибками) параметров механизма.

Ниже последовательно рассмотрим первичные отклонения применительно к:

- поступательной паре, являющейся моделью салазок поступательного движения (ползун на направляющих),
- вращательной паре, являющейся моделью поворотного стола.

Для построения искомой матричной и имитационной модели, например, 5-ти координатного станка мод. МС – 300 оказывается вполне достаточным описание отклонений этих двух кинематических пар.

На рис. 2.2, а) представлен общий вид 5 координатного станка мод. МС 300, являющегося типичным примером станка с последовательной структурой [20], а на рис. 2.2, б) - структурная схема механизмов его несущей системы.

Как видно из структурной схемы рис.2.2, б) в несущей системе станка используются две группы механизмов. С помощью первой группы механизмов «станина (1)→ салазки (2)→ стойка (3) → шпиндельная бабка (4)» осу-

существляется перемещение корпуса шпинделя по линейным координатам X, Y, Z.

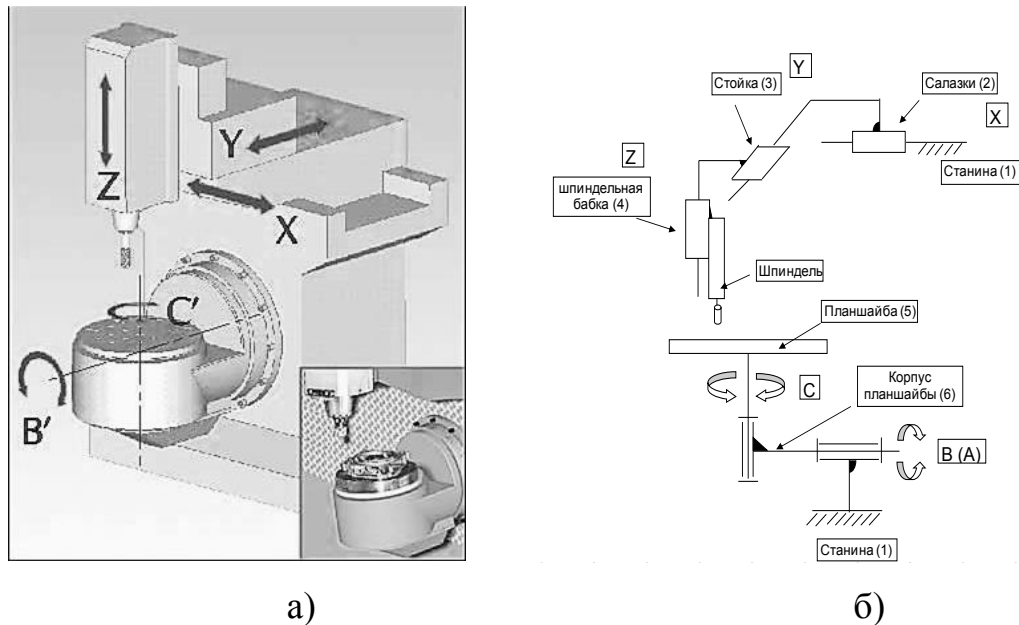


Рис. 2.2. 5 координатный станок мод. МС 300: а) общий вид станка, б) структурная схема несущей системы

С помощью второй группы механизмов «станина (1)→ корпус планшайбы (5)→ планшайба (6)» осуществляется движение обрабатываемой детали по угловым координатам С, В. В механизмах перемещения корпуса шпинделя применяются 3 поступательные пары, а в механизмах поворотного стола - 2 вращательные пары.

2.3. Первичные отклонения для механизма «управляемый по программе ползун»

На рис. 2.3, а) представлена типичная схема привода подач по линейной координате в станке [72], например, по координате X. Для решения поставленной задачи создания математической модели отклонения взаимного положения выходных звеньев многокоординатной машины предлагается рассматривать привод подач, используя понятия и термины теории механизмов и машин следующим образом. Входным звеном будем считать управляющую программу с системой ЧПУ, а выходным звеном являются салазки, перемещающиеся по линейным направляющим. Такой механизм будем назы-

вать «управляемый по программе ползун», блок-схема которого представлена на рис. 2.3, б).

Если бы механизм «управляемый по программе ползун» по координате X был бы идеальным, то тогда салазки находились бы точно в положении $X = X_n$ мм относительно нулевой точки салазок и по всем другим 5 неуправляемым координатам (Y, Z, A, B, C) были бы нулевые отклонения.

В неидеальном механизме «управляемый по программе ползун» салазки будут находиться в направлении оси X в положении с отклонением $\delta_x(x) = x_d - x_n$ и с отклонениями по другим 5 координатам (Y, Z, A, B, C) как твердое тело в пространстве.

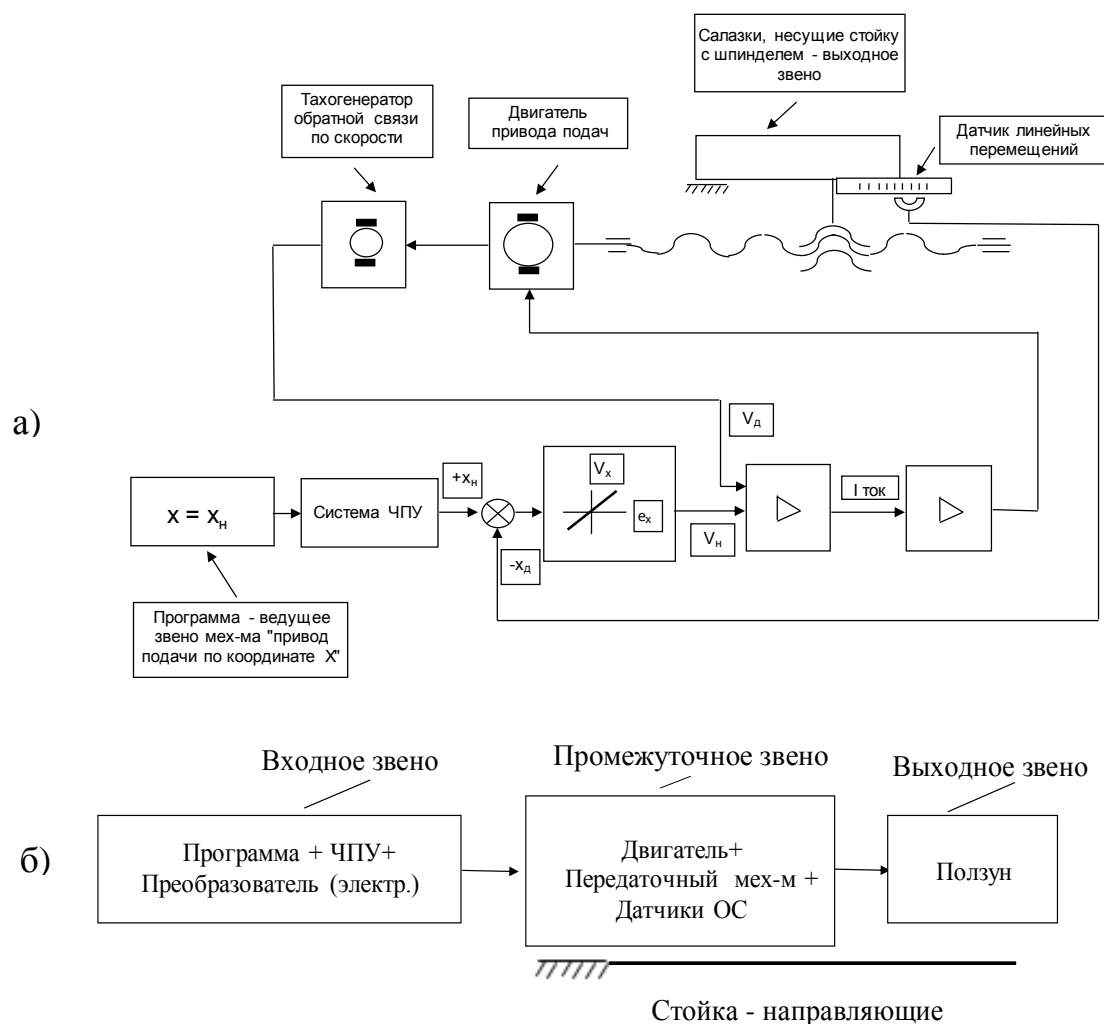


Рис. 2.3. Механизм «управляемый по программе ползун» а) Принципиальная схема привода салазок по координате X , б) Блок-схема механизма «управляемый по программе ползун»

На рис. 2.4 представлены отклонения в положении салазок (ползуна) на направляющих в механизме «управляемый по программе ползун» [158, 93] (обозначения в соответствии с ISO 230-7). Линейные отклонения: δ_x (EXX), δ_y (EYX), δ_z (EZX) вдоль X, Y, Z и угловые отклонения: α_x (EAX), α_y (EBX), α_z (ECX) - повороты вокруг осей X, Y, Z.

Эти отклонения являются первичными отклонениями выходного звена – салазок.

Для построения модели интегрального отклонения по первичным отклонениям удобно пользоваться не уравнениями движения твердого тела в пространстве в функции времени, а в виде уравнений в функции координаты x_H невозмущенного поступательного движения ползуна относительно неподвижной системы координат, связанной с направляющими $\delta_x(x_H)$, $\delta_y(x_H)$, $\delta_z(x_H)$, $\alpha_x(x_H)$, $\alpha_y(x_H)$, $\alpha_z(x_H)$.

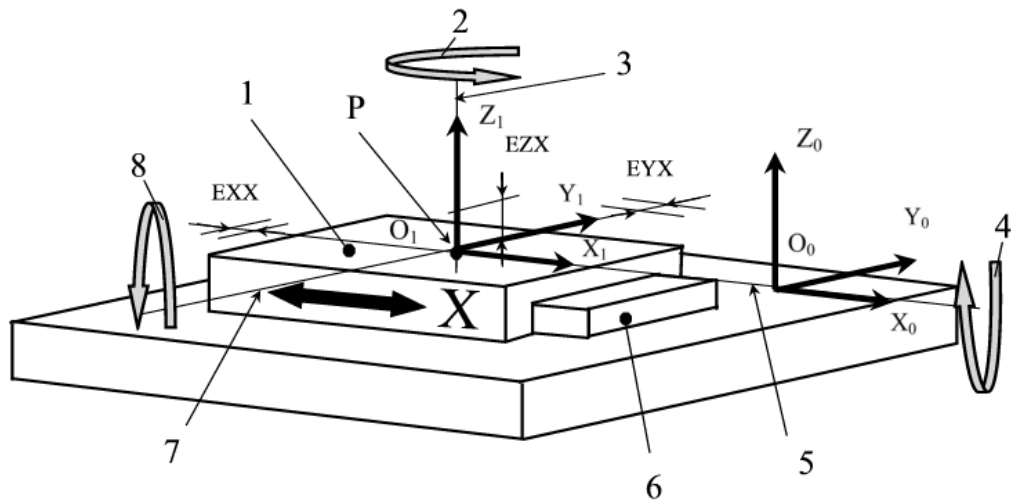


Рис. 2.4. Первичные отклонения салазок (ползуна), перемещаемым по программе по прямолинейным направляющим (линейная координата X): 1 – ползун (салазки), 2 - отклонения (поворот) ECX вокруг оси Z, 3 - линия измерения отклонений EZX от прямолинейности в пл. XZ, 4 - отклонения (поворот) EAX вокруг оси X, 5 - линия измерения отклонений EXX позиционирования вдоль X, 6 – направляющие, 7 - линия измерения отклонений EYX от прямолинейности в пл. XY, 8 - Отклонения (поворот) EBX вокруг оси Y

В соответствии с [55] переход тела из одного положения в другое смежное может быть совершен при помощи различных поступательных перемещений, зависящих от выбора той точки тела (полюса), перемещение которой определяет поступательное перемещение. Из этого следует, что при проведении измерений отклонений нужно иметь в виду, что они относятся к определенному полюсу и нужно:

- фиксировать (измерять) положение полюса на перемещаемом теле (ползуне),
- проводить все измерения отклонений относительно этого полюса Р (рис. 2.4).

Полюс Р находится в точке пересечения линий измерений (3, 5, 7). В эту же точку помещается начало O_1 системы координат $X_1Y_1Z_1$, связанной с ползуном. При переходе к другому полюсу полученные результаты измерений должны быть пересчитаны в соответствии с координатами старого и нового полюса и положения осей поворота.

При построении модели интегрального отклонения по первичным отклонениям необходимо использовать как информацию об отклонениях, так и о координатах полюса относительно баз перемещаемого тела (ползуна) (X_p, Y_p, Z_p).

Таким образом, исходной информацией для построения модели интегрального отклонения для салазок (механизм «управляемый по программе ползун») является:

- отклонение $\delta_x(x_n) = x_d - x_n$ при позиционировании вдоль координаты X (ЕХХ),
- отклонение от прямолинейности $\delta_y(x_n)$ в пл. XY (ЕYX),
- отклонение от прямолинейности $\delta_z(x_n)$ в пл. XZ (ЕZX),
- поворот $\alpha_x(x_n)$ вокруг оси X (ЕАХ),
- поворот $\alpha_y(x_n)$ вокруг оси Y (ЕВХ),
- поворот $\alpha_z(x_n)$ вокруг оси Z (ЕСХ)

- координаты линий измерения линейных отклонений $\delta_x(x_n)$, $\delta_y(x_n)$, $\delta_z(x_n)$, принимая, что полюс перемещений находится в точке их пересечения.

2.4. Первичные отклонения для механизма «управляемый по программе шарнир»

Аналогичный подход к описанию первичных отклонений можно применить к механизму привода подачи по угловой координате.

На рис. 2.5 представлены схемы различных конструкций поворотных столов, имеющих две степени подвижности. На рис. 2.5, а) представлен поворотный стол консольной конструкции станка мод. МС - 300 и поворотный стол с двумя опорами (типа «люлька») станка мод. МС - 700 (ОАО НИАТ). Планшайба, независимо от конструкции поворотного стола, предназначена для поворота обрабатываемой детали по координате С. Поворот корпуса планшайбы в зависимости от конструкции стола осуществляется либо вокруг оси Y (угловая координата В) (рис. 2.5, а), либо вокруг оси X (угловая координата А) (рис. 2.5, б). Структурная схема механизма поворота планшайбы по двум независимым степеням подвижности одна и та же для обеих конструкций поворотного стола, и представлена в составе схемы на рис. 2.3.

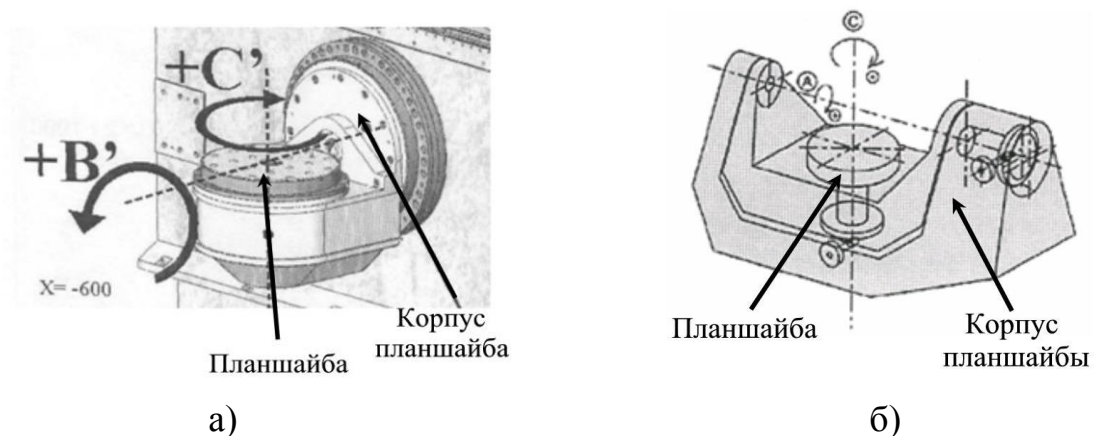


Рис. 2.5. Поворотные столы: а) консольный поворотный стол станка мод. МС - 300, б) двухопорный поворотный стол станка мод. МС - 700

На рис. 2.6 представлена схема механизма «управляемый по программе шарнир - поворотный стол». Здесь (рис. 2.6, а) те же самые элементы, что и в приводе подачи по линейной координате, за исключением того, что вместо

салазок используется поворотный стол, а вместо датчика линейных перемещений используется датчик угла поворота. На рис. 2.6, б) представлена блок-схема механизма «управляемый по программе шарнир».

Аналогично рассмотрим движение планшайбы поворотного стола.

Будем рассматривать движение планшайбы как совокупность двух движений: идеального вращения вокруг неподвижной оси и наложенные на него малые отклонения $\delta_x(\varphi_n)$, $\delta_y(\varphi_n)$, $\delta_z(\varphi_n)$, $\alpha_x(\varphi_n)$, $\alpha_y(\varphi_n)$, $\alpha_z(\varphi_n)$.

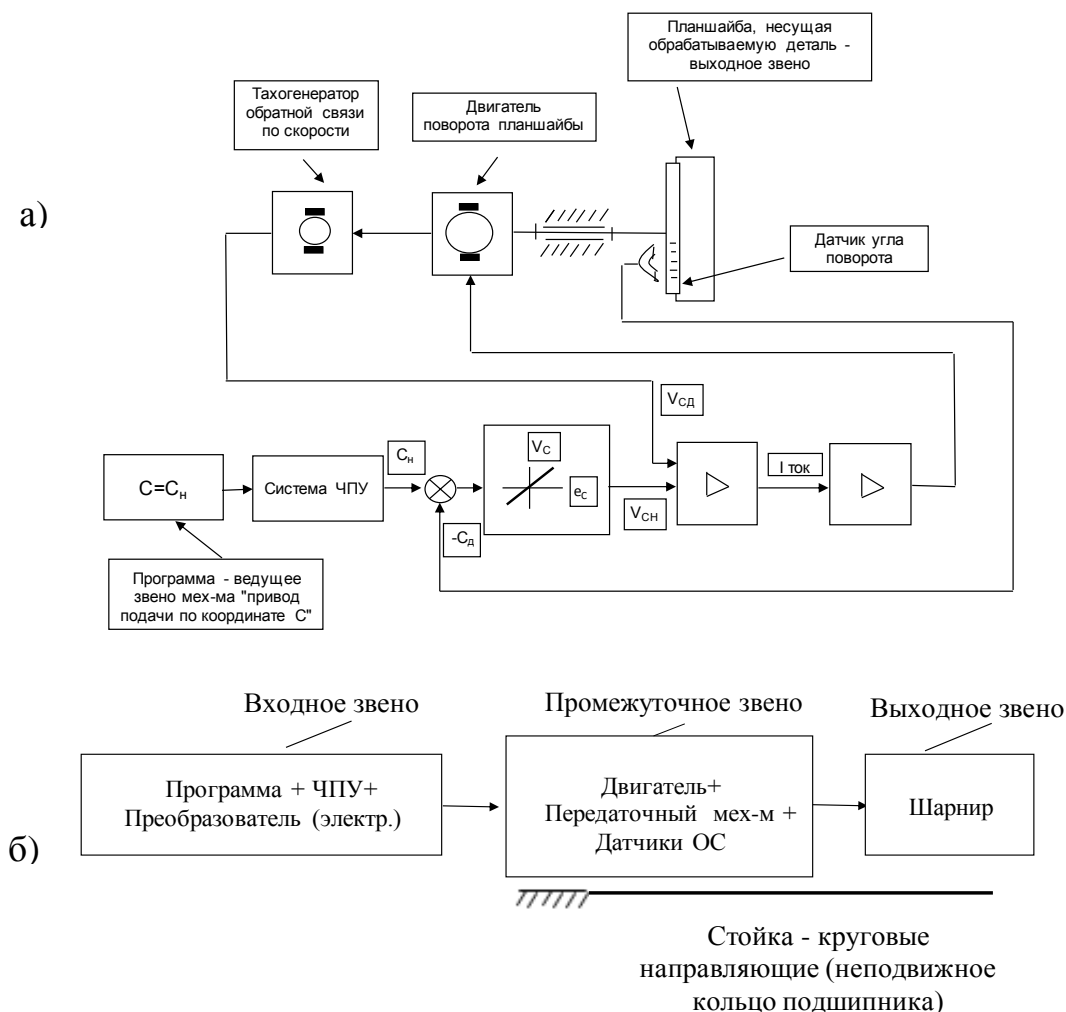


Рис. 2.6. Механизм «управляемый по программе шарнир»: а) Принципиальная схема привода салазок по координате С, б) Блок-схема механизма «управляемый по программе шарнир»

Движение «малые отклонения» возникают в результате:

- отклонений реальных соединительных поверхностей,
- наличия зазоров или натягов,
- статических и динамических контактных деформаций и др.

Идеальное вращение осуществляется за счет движения идеальных соприкасающихся поверхностей (цилиндрической и опорной или конических). Накладываемое малое движение складывается из 3-х линейных отклонений полюса (вдоль осей X_0, Y_0, Z_0 неподвижной системы координат) $\delta_x(\varphi_n)$ (ЕХС), $\delta_y(\varphi_n)$ (ЕУС), $\delta_z(\varphi_n)$ (ЕЗС) в функции угла поворота планшайбы φ_n и 3-х малых отклонений углов $\alpha_x(\varphi_n)$ (ЕАС), $\alpha_y(\varphi_n)$ (ЕВС), $\alpha_z(\varphi_n)$ (ЕСС) вокруг осей X, Y, Z неподвижной системы координат.

На рис. 2.7 представлены отклонения планшайбы (выходного звена механизма «управляемый по программе шарнир») как малые отклонения абсолютно твердого тела в пространстве: линейные отклонения $\delta_x(\varphi_n), \delta_y(\varphi_n), \delta_z(\varphi_n)$ вдоль X, Y, Z и угловые отклонения $\alpha_x(\varphi_n), \alpha_y(\varphi_n), \alpha_z(\varphi_n)$ (повороты) вокруг осей X, Y, Z , что соответствует стандарту ISO 230-7.

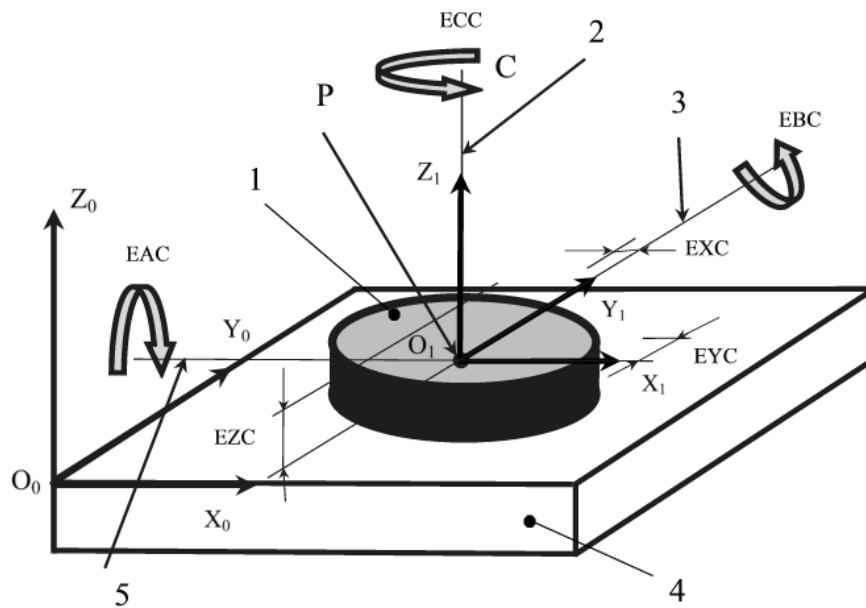


Рис. 2.7. Планшайба, поворачиваемая по программе вокруг оси C (угловая координата C): 1 – планшайба, 2 - линия измерения аксиального биения EZC , 3 - линия измерения радиального биения EYC в направлении оси Y , 4 - корпус планшайбы, 5 - линия измерения радиального биения EXC в направлении оси X

Здесь: $O_0X_0Y_0Z_0$ – неподвижная декартова система координат, связанная с корпусом планшайбы, $O_1X_1Y_1Z_1$ – система координат, связанная с планшайбой, EXC – радиальное биение планшайбы в направлении оси X , EYC – радиальное биение планшайбы в направлении оси Y , EZC – аксиаль-

ное биение планшайбы в направлении оси Z, EAC - поворот вокруг оси, параллельной оси X, EBC - поворот вокруг оси, параллельной оси Y, ECC – отклонение позиционирования по углу поворота планшайбы, P– полюс планшайбы.

Таким образом, исходной информацией для построения модели отклонений исполнительного органа машины являются следующие отклонения, касающиеся планшайбы как выходного звена механизма «управляемый по программе шарнир»:

- отклонение позиционирования по угловой координате C (ECC),

$$\alpha_z(\varphi_n) = \varphi_d - \varphi_n,$$
- аксиальное биение $\delta_z(\varphi_n)$, EZC (отклонение по оси Z при вращении стола, измеренное на оси вращения),
- радиальное биение $\delta_x(\varphi_n)$, EXC (смещение оси поворота C по координате X, эксцентриситет),
- радиальное биение $\delta_y(\varphi_n)$, EYC (смещение оси поворота C по координате Y, эксцентриситет),
- разворот оси поворота C $\alpha_x(\varphi_n)$ в плоскости ZOХ, (EAC),
- разворот оси поворота C $\alpha_y(\varphi_n)$ в плоскости ZOУ, (EBC),
- координаты линий измерения линейных отклонений $\delta_z(\varphi_n)$, $\delta_x(\varphi_n)$, $\delta_y(\varphi_n)$ (считается, что полюс P линейных перемещений находится в точке их пересечения).

Для составления модели образования отклонений исполнительных органов (отклонений между присоединительными поверхностями шпинделя (конус и торцевая поверхность) и присоединительными поверхностями рабочего стола (торцевая поверхность планшайбы, цилиндрическая поверхность центрального отверстия и ось вспомогательного отверстия)), необходимо разбить несущую систему станка на подсистемы. Каждая подсистема должна представлять собой механизм «управляемый по программе ползун» или механизм «управляемый по программе шарнир». В этом случае можно осу-

шествовать переход из системы координат выходного звена одного механизма к выходному звену другого механизма через матрицу перехода, составляемой по информации о первичных отклонениях выходных звеньев и информации о связи между стойками указанных механизмов.

На рис. 2.8 представлена последовательная кинематическая цепь, составленная из звеньев, имеющих только идеальные вращательные пары [142]. Здесь: a_i – общий перпендикуляр к оси $i + 1$ и оси i (наименьшее расстояние между осями i и $i + 1$), d_i – расстояние между общими перпендикулярами к трём осям $i - 1$, i , $i + 1$, α_i – угол между скрещивающимися осями i и $i + 1$, θ_i – угол между общими перпендикулярами к трём осям $i - 1$, i , $i + 1$.

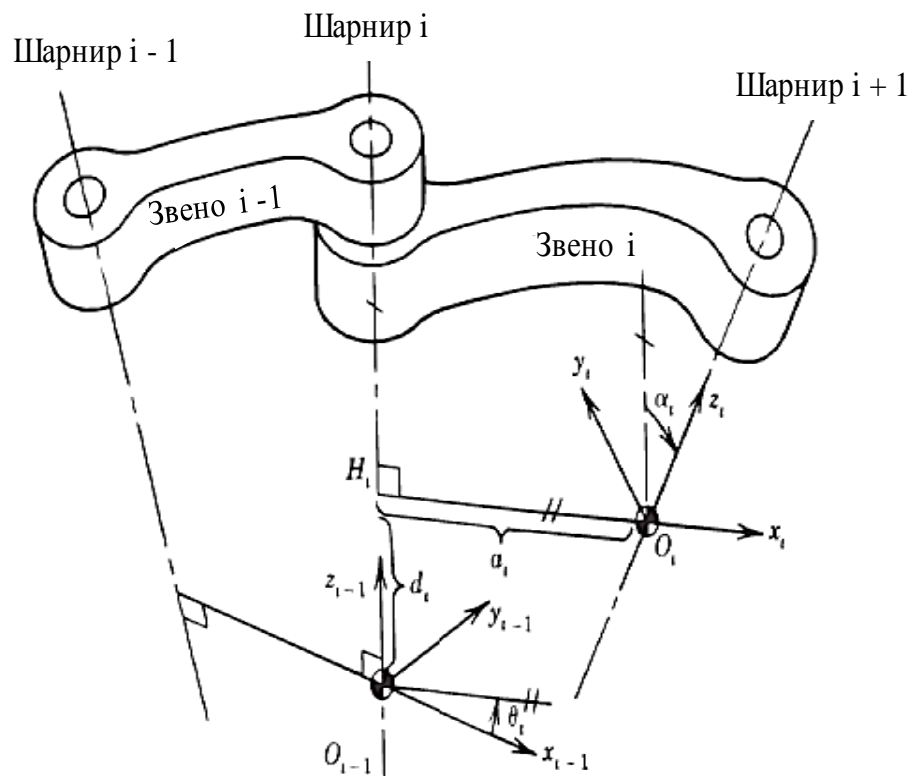


Рис. 2.8. Последовательная кинематическая цепь, составленная из звеньев, имеющих только вращательные пары

Заменим идеальные вращательные пары идеальными механизмами «управляемый по программе шарнир». В этом случае переход из системы ко-

ординат ($O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$) выходного звена механизма $i - 1$ в систему координат ($O_iX_iY_iZ_i$) выходного звена механизма i «управляемый по программе шарнир» осуществляется в соответствии с кинематической моделью, предложенной Denavit and Hartenberg (D-H) [142, 34, 189]. Для записи уравнений перехода из одной системы координат в другую и обратно будем использовать форму в соответствии с [76]:

$$\bar{r}_0 = A_{i-1,i} \bar{r}_i, \quad \bar{r}_i = A_{i-1,i}^{-1} \bar{r}_0, \quad A_{i-1,i}^{-1} = inv(A_{i-1,i}).$$

Здесь матрица $A_{i-1,i}$ вычисляется в соответствии с [142]

$$A_{i-1,i} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Для описания перехода при идеальных шарнирах необходимо знание 4 параметров на один переход от механизма «управляемый по программе шарнир» $i-1$ к механизму «управляемый по программе шарнир» i : α_i , a_i , θ_i , d_i

Если рассматривается несущая система, состоящая из последовательно соединенных неидеальных механизмов «управляемый по программе шарнир» (неидеальные вращательные пары), то для описания перехода от механизма $i - 1$ к механизму i необходимо знание 10 параметров: α_i , a_i , θ_i , d_i и $\delta_x(\varphi_n)$, $\delta_y(\varphi_n)$, $\delta_z(\varphi_n)$, $\alpha_x(\varphi_n)$, $\alpha_y(\varphi_n)$, $\alpha_z(\varphi_n)$. Соответствующая матрица $A_{i-1,i}$ будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
A_{i-1,i} = & \begin{pmatrix} 100 & \delta_x(\varphi_H) \\ 010 & \delta_y(\varphi_H) \\ 001 & \delta_z(\varphi_H) \\ 000 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_x(\varphi_H)) & -\sin(\alpha_x(\varphi_H)) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_x(\varphi_H)) & \cos(\alpha_x(\varphi_H)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\
& \begin{pmatrix} \cos(\alpha_y(\varphi_H)) & 0 & \sin(\alpha_y(\varphi_H)) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha_y(\varphi_H)) & 0 & \cos(\alpha_y(\varphi_H)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\alpha_z(\varphi_H)) & -\sin(\alpha_z(\varphi_H)) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_z(\varphi_H)) & \cos(\alpha_z(\varphi_H)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\
& \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)
\end{aligned}$$

Для несущей системы, состоящей из последовательно соединенных неидеальных механизмов «управляемый по программе ползун», то переход из системы координат выходного звена одного механизма к выходному звену другого последовательно подсоединенного механизма осуществляется аналогичным образом, только по упрощённой схеме:

1) При переходе от неподвижного звена (станина) к выходному звену (салазкам) механизма «управляемый по программе ползун» $\alpha_1 = 0$, $a_1 = 0$, $\theta_1 = 0$, $d_1 = 0$ и 6 параметров перехода: $\delta_x(x_H)$, $\delta_y(x_H)$, $\delta_z(x_H)$, $\alpha_x(x_H)$, $\alpha_y(x_H)$, $\alpha_z(x_H)$.

2) При переходе от выходного звена одного механизма «управляемый по программе ползун» к выходному звену другого механизма «управляемые по программе салазки», расположенных в одной плоскости, например, XY $\alpha_2 = 0$, $a_2 = 0$, $d_3 = 0$ и 7 параметров перехода: $\theta_2 = \Theta_{xy}$, $\delta_x(y_H)$, $\delta_y(y_H)$, $\delta_z(y_H)$, $\alpha_x(y_H)$, $\alpha_y(y_H)$, $\alpha_z(y_H)$.

3) При переходе от выходного звена одного механизма «управляемый по программе ползун» к выходному звену другого механизма «управляемый

по программе ползун, находящихся в одной плоскости, например, XZ и расположенной перпендикулярно или под другим углом к плоскости, которая проходит через направляющие двух предшествующих механизмов (плоскости XY) $\alpha_2 = 0$, $a_2 = \Theta_{zx}$, $\theta_2 = \Theta_{zy}$, $d_3 = 0$ и 8 параметров перехода: $a_2 = \Theta_{zx}$, $\theta_2 = \Theta_{zy}$, $\delta_x(y_H)$, $\delta_y(y_H)$, $\delta_z(y_H)$, $\alpha_x(y_H)$, $\alpha_y(y_H)$, $\alpha_z(y_H)$.

Прежде чем переходить к декомпозиции несущей системы машины на подсистемы, содержащие по одному механизму «управляемый по программе ползун/шарнир», предварительно рассмотрим понятие «несущая система» машины и принцип разбивки её на подсистемы.

2.5. Несущая система машины

Несущая система (НС) станка образуется совокупностью элементов станка, через которые замыкаются силы, возникающие между инструментом и заготовкой в процессе резания. Такое определение дал проф. Д.Н. Решетов [28]. Развивая понятие НС [28, 127] применительно к понятию машина, будем считать, что **НС машины – это совокупность механизмов**, через которые осуществляется передача сил в процессе её функционирования.

Применительно к станку, НС - это уже не только станина, корпусные детали, детали узлов для поддержания и перемещения инструмента и обрабатываемой детали, но и механизмы преобразования движений, охваченные или неохваченные обратными связями, включая приводы (электрические, гидравлические, пневматические и др.).

В станках с несущей системой, имеющей последовательную структуру [20], разбивку можно проводить по отдельным системам НС, осуществляющим движение, по каждой координате.

Эта процедура описывается в следующей главе.

2.6. Общие замечания по определению первичных отклонений звеньев, входящих в другие кинематические пары

Общее количество первичных отклонений любого звена, входящего в ту или иную кинематическую пару равно 6 (3 линейных отклонения и 3 угловых отклонения).

Каждое из 6 отклонений является функцией переменных, определяющих положение одного звена относительно другого. Число переменных зависит от числа степеней свободы. Так, для:

- поступательной пары таким параметром является перемещение вдоль линейной направляющей ползуна,
- вращательной пары таким параметром является угловое перемещение вокруг оси вращения шарнира,
- винтовой пары таким параметром является угловое относительное перемещение гайки и винта, либо, если винтовая пара является несамотормозящей, то параметром может быть линейное относительное перемещение винта и гайки,
- цилиндрической пары такими параметрами являются уже два: 1) линейное перемещение вдоль цилиндрической направляющей, 2) угловое перемещение втулки вокруг оси цилиндрической пары,
- сферической пары с пальцем являются два параметра: два угловых перемещения вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, жёстко связанных с одним из звеньев, входящих в пару,
- сферической пары являются три параметра: три угловых перемещения вокруг трёх взаимно перпендикулярных осей, жёстко связанных с одним из звеньев, входящих в пару,
- плоскостной пары являются три параметра: 1) два линейных относительных перемещения одного звена относительно другого вдоль двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в плоскости плоскостной пары и жёстко связанных с одним из звеньев, входящих в пару, 2) одно угловое перемещение вокруг оси, перпендикулярной плоскости плоскостной пары,

- пары «цилиндр – плоскость» являются четыре параметра: 1) два линейных относительных перемещения одного звена относительно другого вдоль двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в плоскости пары и жёстко связанных с звеном, её реализующим, 2) угловым перемещением цилиндра вокруг оси, перпендикулярной плоскости пары, 3) угловым перемещением цилиндра вокруг оси, параллельной оси цилиндра,

- пары «шар – плоскость» являются пять параметров: 1) два линейных относительных перемещения центра шара вдоль двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в плоскости пары и жёстко связанных с звеном, её реализующим, 2) трёх угловых перемещений шара вокруг трёх взаимно перпендикулярных осей, две из которых совпадают с осями пункта 1, а третья ось перпендикулярна им.

Построение модели отклонения выходного звена как совокупности всех первичных отклонений звеньев механизма можно осуществлять последовательными переходами от каждого ведущего звена к выходному звену через соответствующие кинематические цепи и соответствующие кинематические пары. Для последовательных кинематических цепей со звеньями, имеющими поступательные и вращательные пары, переход от одного звена к другому описан в настоящей главе. Для звеньев, имеющих кинематические пары с числом степеней свободы $i > 1$, необходимо применение искусственной замены кинематической пары с i степенями свободы на эквивалентную сумму кинематических пар с 1 степенью свободы. Хотя так можно принципиально описывать первичные отклонения звеньев механизма с любыми кинематическими парами, однако это существенно увеличивает число первичных отклонений и усложняет процесс построения модели отклонения выходного звена.

2.7. Выводы по главе

1) Развито описание первичных отклонений звеньев механизмов с поступательными и вращательными парами. Предложено любой привод по отдельной координате рассматривать как отдельный механизм «управляемый по программе ползун» или «управляемый по программе шарнир».

2) Выявлены общие подходы к описанию первичных отклонений, которые позволяют распространить представленное описание первичных отклонений также на звенья, входящие в любые кинематические пары, в механизмах любой параллельно-последовательной структуры.

3) Установлено правило измерений первичных отклонений звеньев механизмов на примере механизмов с поступательными и вращательными парами, заключающийся в строгой привязке первичных отклонений к полюсу малых возмущённых перемещений звена механизма, который располагается в точке пересечения линий измерения линейных отклонений.

ГЛАВА III. МОДЕЛЬ ОТКЛОНЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ

3.1. Введение

В данной главе рассмотрено построение модели отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатной машины последовательной структуры. Представленный подход является универсальным. Он может быть применён также к машинам, в несущей системе которых используются механизмы более сложных структур.

В предыдущей главе были рассмотрены первичные отклонения звеньев, входящих в поступательные и вращательные кинематические пары, в понятиях норм точности станков, и стратегия разбивки несущей системы станка на управляемые по программе механизмы. Это является основой для создания модели матричного вида. Модели такого типа являются мощным инструментом исследования точностных возможностей различных структур машин (станков) и совершенствования используемых алгоритмов коррекции.

Построение модели [93] будем проводить на примере 5 координатного станка мод. МС - 300.

3.2. Математическая модель образования интегрального отклонения для 5 координатного станка

3.2.1. Декомпозиция НС станка на независимые управляемые по программе механизмы

Применительно к 5 координатному станку мод. МС 300 (рис. 3.1 и рис. 3.2) мы имеем две группы кинематически независимых механизмов.

С помощью одной группы механизмов реализуются 3 степени подвижности по линейным координатам X , Y , Z и осуществляются перемещения корпуса шпинделя по следующей схеме: «станина (1) \rightarrow X салазки (2) \rightarrow Y стойка (3) \rightarrow Z шпиндельная бабка (4)». Здесь мы имеем три механизма «управляемый по программе ползун», звено «стойка» каждого из которых

устанавливается на выходном звене предшествующего механизма. Это следующие механизмы:

- «станина (1) → X салазки (2)» (двигатель установлен на станине, салазки перемещаются по направляющим, расположенным на станине),
- «салазки (2) → Y стойка (3)» (двигатель установлен на салазках, стойка перемещается по направляющим, расположенным на салазках),
- «стойка (3) → Z шпиндельная бабка (4)» (двигатель установлен на стойке, шпиндельная бабка перемещается по направляющим, расположенным на стойке).

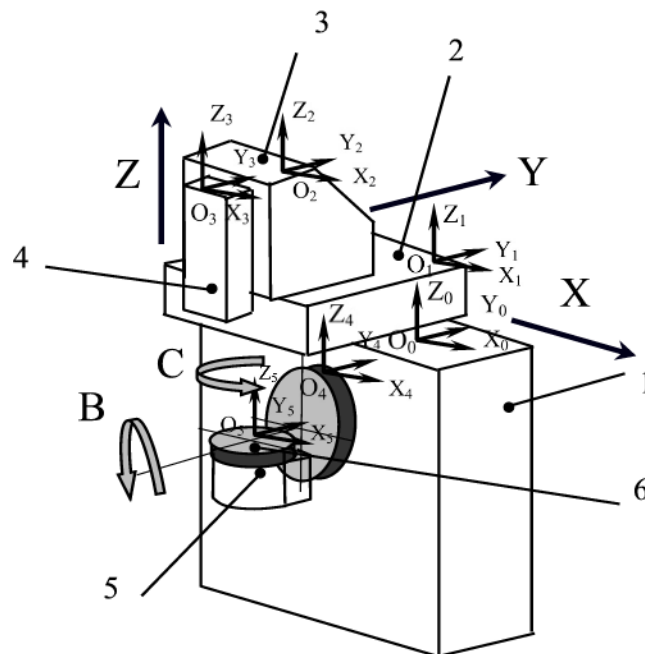


Рис. 3.1. Компоновочная схема станка с системами координат, расположенными на звеньях механизмов несущей системы

Здесь: 1 - станина, 2 – салазки, 3 – стойка, 4 – шпиндельная бабка, 5 – корпус планшайбы, 6 – планшайба.

С помощью другой группы механизмов реализуются 2 степени подвижности по угловым координатам С, В и осуществляются перемещения планшайбы по следующей схеме: «станина (1) → В корпус планшайбы (5) → С планшайба (6)». Здесь мы имеем два механизма «управляемый по про-

грамме шарнир», звено «стойка» каждого из которых устанавливается на выходном звене предшествующего механизма. Это следующие механизмы:

- «станина (1) → В корпус планшайбы (5)» (статор двигателя установлен в станине, а ротор двигателя жестко скреплен с корпусом планшайбы),
- «корпус планшайбы (5) → С планшайба (6) (статор двигателя установлен в корпусе планшайбы, а ротор двигателя жестко скреплен с планшайбой)».

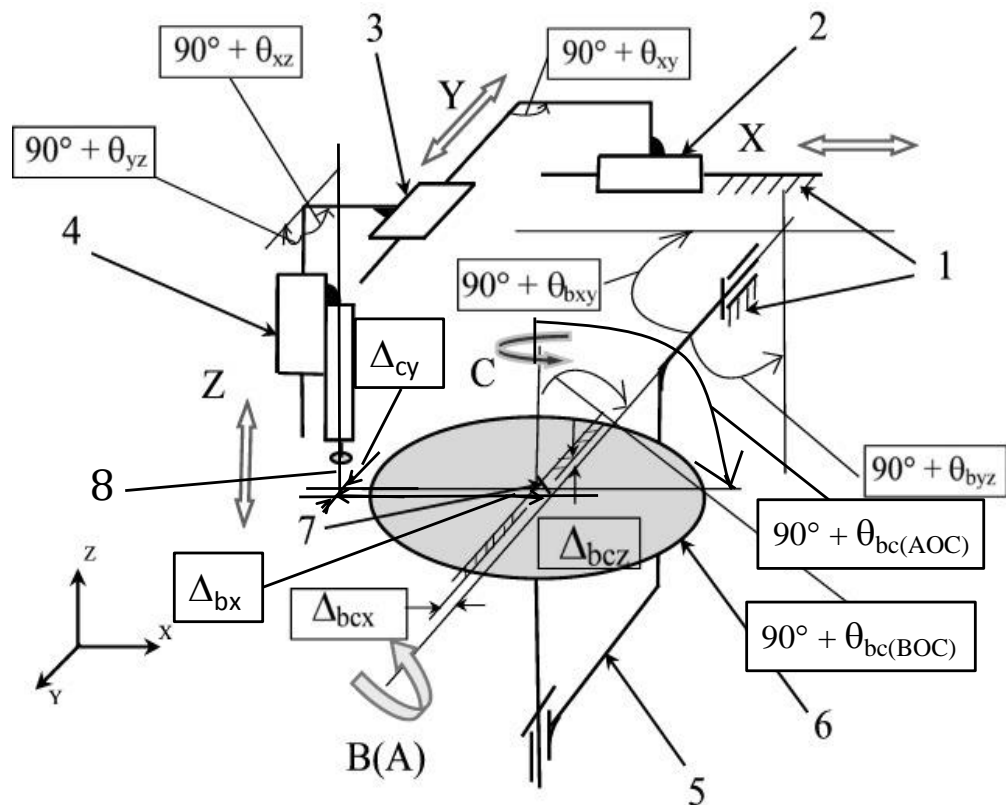


Рис. 3.2. Структурная схема механизмов несущей системы станка.

Здесь: 1 - станина, 2 – салазки, 3 – стойка, 4 – шпиндельная бабка, 5 – корпус планшайбы, 6 – планшайба, 7 – отклонение от пересечения осей В С.

На рис. 3.3 представлен «граф» систем координат, связанных с выходными звеньями рассмотренных выше управляемых по программе механизмов.

Рассмотрим последовательно все указанные механизмы и переходы от одного выходного звена к другому через переход из одной системы координат в другую и обратно.

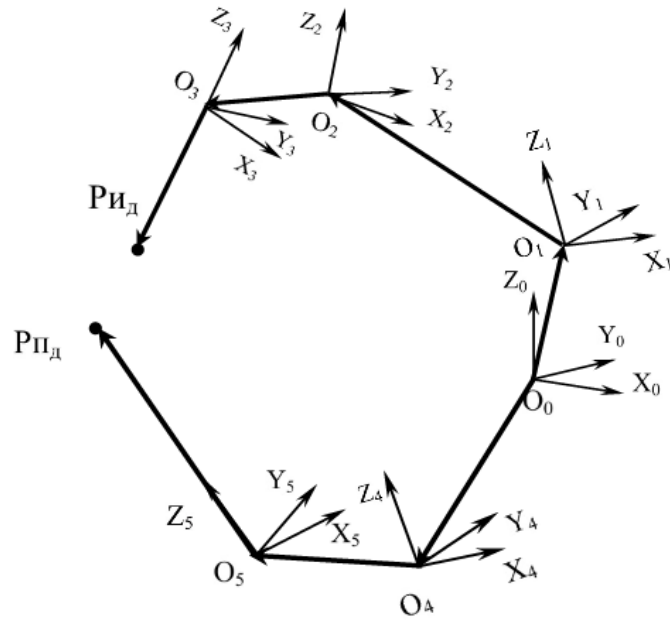


Рис. 3.3. «Граф» систем координат для выделенных подсистем несущей системы станка. $P_{Ид}$ – точка, принадлежащая инструменту для действительного станка. $P_{д}$ – точка, принадлежащая детали в приспособлении для действительного станка

3.2.1.1. Станина

Считается, что станина неподвижна и на ней расположена неподвижная система координат $O_0(X_0, Y_0, Z_0)$. Начало координат может находиться в любой точке. Ось X лежит в плоскости направляющих X (присоединительные поверхности станины и направляющих) и направлена параллельно им, ось Y лежит в плоскости направляющих X и перпендикулярна оси X , ось Z перпендикулярна оси X и Y .

3.2.1.2. Управляемый по программе механизм «Станина (1) → X салазки (2)»

Выходное звено - салазки перемещаются по направляющим станины и реализуют перемещение по координате X . С ними связана система координат $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$. Пл. $X_1O_1Y_1$ параллельна пл. $X_0O_0Y_0$. Начало координат $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ мы должны поместить на линию измерения отклонений позиционирования. Рабочие плоскости поверочных линеек (рис. 3.4) должны проходить через линию измерения отклонений позиционирования. Линии измерений от прямолинейности в двух плоскостях $X_1O_1Y_1$ и $X_1O_1Z_1$ (линии пе-

ремещения измерительных наконечников головок) должны пересекаться и точка пересечения лежит на линии измерения отклонений позиционирования. Точка Р пересечения линий измерения является полюсом салазок и в этой точке размещается начало координат $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$. При любом другом расположении начала координат $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ необходимо производить пересчет отклонений позиционирования и отклонений от прямолинейности движения салазок в соответствии с измеренными значениями углов поворота салазок вокруг осей X, Y, Z, координат линий измерения и координат осей поворота. Измерение координат осей дополнительных поворотов является сложной метрологической задачей, поэтому целесообразно полюс Р помещать в точку пересечения линий измерения.

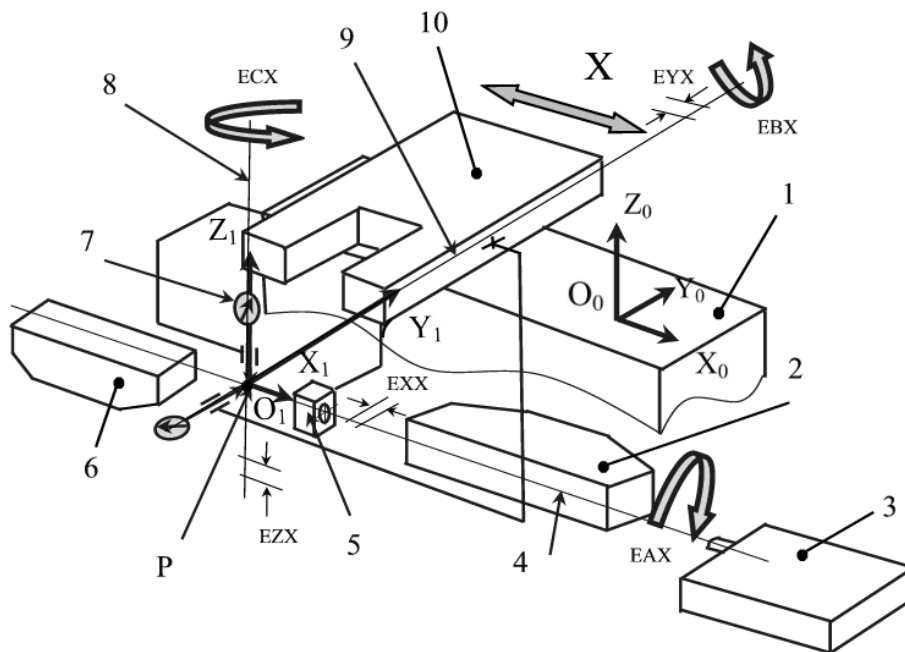


Рис. 3.4. Схема измерений первичных отклонений в подсистеме «Станина (1) → X салазки (2)»

Здесь: 1 – станина станка, 2 - поверочная линейка в положении измерения отклонений от прямолинейности в пл. $X_0O_0Y_0$, 3 – лазер, 4 - линия измерения отклонений позиционирования вдоль оси X, 5 – оптический отражатель, 6 – поверочная линейка в положении измерения отклонений от прямо-

линейности в пл. $X_0O_0Z_0$, 7 -индикаторная головка, 8 - линия измерения отклонений от прямолинейности в пл. $X_0O_0Z_0$, 9 - линия измерения отклонений от прямолинейности в пл. $X_0O_0Z_0$, 10 – салазки. $O_0X_0Y_0Z_0$ – система координат, жестко связанная со станиной 1, $O_1X_1Y_1Z_1$ - система координат, жестко связанная с салазками 10.

При движении управляемых по программе салазок по направляющим станины существуют следующие первичные отклонения (см. Глава II), определяющие отклонения салазок относительно станины:

$\delta_x(x_0)$ - отклонения позиционирования в функции координаты x_0 при движении каретки вдоль оси X_0 (ЕХХ),

$\delta_y(x_0)$ – отклонения от прямолинейности в плоскости $X_0O_0Y_0$ (ЕYX),

$\delta_z(x_0)$ - отклонения от прямолинейности в плоскости $X_0O_0Z_0$ (ЕZХ),

$\alpha_x(x_0)$ – поворот вокруг оси X_0 при движении каретки вдоль оси X_0 (ЕАХ),

$\alpha_y(x_0)$ – поворот вокруг оси Y_0 (ЕВХ),

$\alpha_z(x_0)$ - поворот вокруг оси Z_0 (ЕСХ).

Указанные отклонения $\delta_x(x_0)$, $\delta_y(x_0)$, $\delta_z(x_0)$, $\alpha_x(x_0)$, $\alpha_y(x_0)$, $\alpha_z(x_0)$ являются исходными данными для построения матрицы перехода из системы координат $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ в систему $O_0(X_0, Y_0, Z_0)$ и обратно в соответствии с [76]

$$\overline{r_0} = A_{0,1} \overline{r_1}, \quad \overline{r_1} = A_{0,1}^{-1} \overline{r_0}, \quad A_{0,1}^{-1} = \text{inv} (A_{0,1}).$$

Матрица перехода $A_{0,1}$ вычисляется с учетом, что $\overline{O_0O_1}$ - вектор смещения начала координат системы $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ в системе $O_0(X_0, Y_0, Z_0)$.

$$\overline{O_0O_1} = \begin{pmatrix} X_{01} \\ Y_{01} \\ Z_{01} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A_{01} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x(x_0) & -\sin \alpha_x(x_0) & 0 \\ 0 & \sin \alpha_x(x_0) & \cos \alpha_x(x_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{01} + \delta_x(x_0) \\ Y_{01} + \delta_y(x_0) \\ Z_{01} + \delta_z(x_0) \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_y(x_0) & 0 & \sin \alpha_y(x_0) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_y(x_0) & 0 & \cos \alpha_y(x_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \alpha_z(x_0) - \sin \alpha_z(x_0) & 0 & 0 \\ \sin \alpha_z(x_0) & \cos \alpha_z(x_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

3.2.1.3. Управляемый по программе механизм «Салазки (2) → Y стойка (3)»

Выходное звено – стойка (3) перемещается по направляющим салазок. Она реализует перемещение в станке по координате Y_1 и с ней связана система координат $O_2 (X_2, Y_2, Z_2)$. Пл. $X_2O_2Y_2$ параллельна пл. $X_1O_1Y_1$ и повернута вокруг оси Z_2 на угол отклонения от перпендикулярности θ_{xy} (рис. 3.2). Аналогично, как при рассмотрении механизма «Станина (1) → X салазки (2)», мы должны начало координат O_2 переместить на линию измерения (рис.3.5) отклонений позиционирования вдоль оси Y_1 . Рабочие плоскости поверочных линеек должны проходить через линию измерения отклонений позиционирования.

Линии измерений отклонений от прямолинейности в двух плоскостях $X_2O_2Y_2$ и $X_2O_2Z_2$ (линии перемещения измерительных наконечников головок) должны лежать в одной плоскости и пересекать линию измерения отклонений позиционирования. Точка P пересечения линий измерения является началом координат $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$.

При движении стойки по направляющим салазок существуют следующие первичные отклонения, определяющие отклонения стойки (как твердого тела в пространстве) относительно салазок:

$\delta_y(y_1)$ - отклонения позиционирования стойки в функции координаты y_1 при её движении вдоль оси Y_1 (EYY),

$\delta_x(y_1)$ – отклонения от прямолинейности стойки в пл. $X_1O_1Y_1$ (EXY),

$\delta_z(y_1)$ - отклонения от прямолинейности стойки в пл. $Y_1O_1Z_1$ (EZY),

$\alpha_x(y_1)$ – поворот вокруг оси X_1 при движении стойки (EAY),

$\alpha_y(y_1)$ – поворот вокруг оси Y_1 при движении стойки (EBY),

$\alpha_z(y_1)$ - поворот вокруг оси Z_1 при движении стойки (ECY).

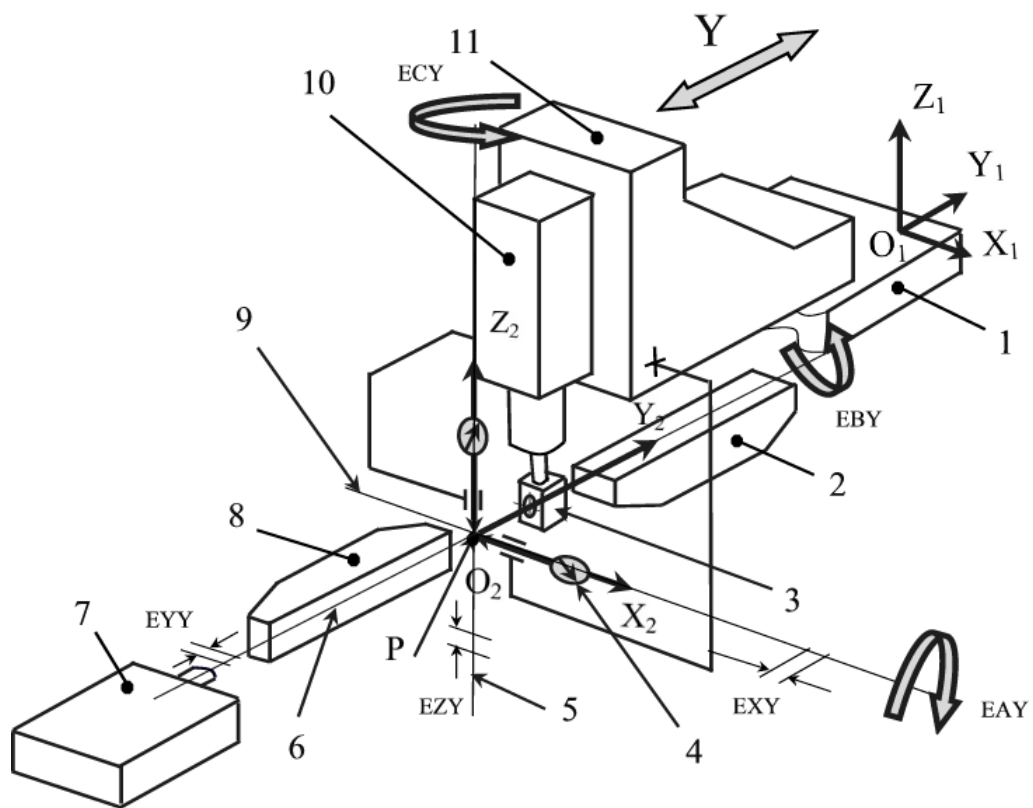


Рис. 3.5. Схема измерений первичных отклонений в подсистеме «Салазки (2) → стойка (3)»

Здесь: 1 – салазки, 2 - поперечная линейка в положении измерения отклонений от прямолинейности в пл. $Z_0O_0Y_0$, 3 - оптический отражатель, 4 - индикаторная головка, 5 - линия измерения отклонений от прямолинейности в пл. $Y_0O_0Z_0$, 6 - линия измерения отклонений позиционирования вдоль оси Y , 7 – лазер, 8 - поперечная линейка в положении измерения отклонений от

прямолинейности в пл. $X_0O_0Y_0$, 9 - линия измерения отклонений от прямолинейности в пл. $Y_0O_0X_0$, 10 – шпindelная бабка, 11 – стойка, $O_1X_1Y_1Z_1$ – система координат, жестко связанная с салазками 1, $O_2X_2Y_2Z_2$ – система координат, жестко связанная со стойкой 11.

Указанные отклонения $\delta_x(y_1)$, $\delta_y(y_1)$, $\delta_z(y_1)$, $\alpha_x(y_1)$, $\alpha_y(y_1)$, $\alpha_z(y_1)$ являются исходными данными для построения матрицы перехода из системы координат $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ в систему $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ и обратно. Кроме того, необходимо учитывать взаимосвязь систем координат $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$, $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ через отклонения от перпендикулярности θ_{xy}

$$\bar{r}_1 = A_{1,2} \bar{r}_2, \quad \bar{r}_2 = A_{1,2}^{-1} \bar{r}_1, \quad A_{1,2}^{-1} = \text{inv} (A_{1,2}).$$

Матрица перехода $A_{1,2}$ вычисляется с учетом, что $\overline{O_1O_2}$ - вектор смещения начала координат системы $O_2 (X_2, Y_2, Z_2)$ в системе (X_1, Y_1, Z_1) .

$$\overline{O_1O_2} = \begin{pmatrix} X_{12} \\ Y_{12} \\ Z_{12} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x(y_1) & -\sin \alpha_x(y_1) & 0 \\ 0 & \sin \alpha_x(y_1) & \cos \alpha_x(y_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{12} + \delta_x(y_1) \\ Y_{12} + \delta_y(y_1) \\ Z_{12} + \delta_z(y_1) \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_y(y_1) & 0 & \sin \alpha_y(y_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_y(y_1) & 0 & \cos \alpha_y(y_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \cos(\alpha_z(y_1) + \theta_{xy}) & -\sin(\alpha_z(y_1) + \theta_{xy}) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_z(y_1) + \theta_{xy}) & \cos(\alpha_z(y_1) + \theta_{xy}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

3.2.1.4. Управляемый по программе механизм «Стойка (3) → Z шпindelная бабка (4)»

Выходное звено - шпindelная бабка перемещается по направляющим, закрепленным на стойке (рис. 3.6). Она реализует перемещение в станке по

координате Z и с ней связана система координат $O_3 (X_3, Y_3, Z_3)$. Пл. $X_3O_3Z_3$ повернута относительно пл. $X_2O_2Y_2$ на угол отклонения от перпендикулярности θ_{yz} (рис. 3.2) вокруг оси X_2 и повернута вокруг оси Y_2 на угол отклонения от перпендикулярности θ_{xz} .

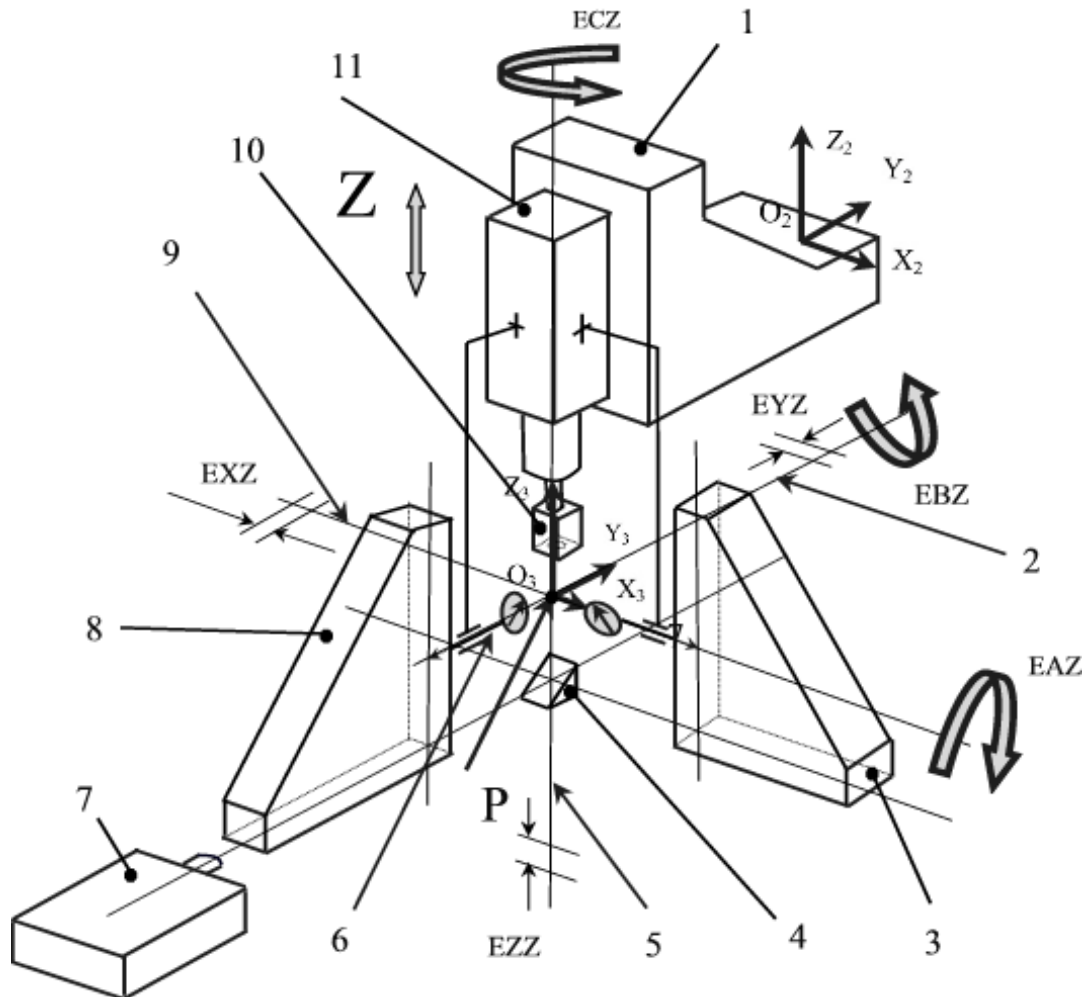


Рис. 3.6 - Схема измерений первичных отклонений в подсистеме «Стойка (3) → шпиндельная бабка (4)»

Здесь: 1 – стойка, 2 – линия измерения отклонений от прямолинейности в пл. $Y_2O_2Z_2$, 3 – поверочный угольник в положении измерения отклонений от прямолинейности в пл. $X_2O_2Z_2$, 4 – оптическое зеркало поворота луча лазера на 90° , 5 – линия измерения отклонений позиционирования вдоль оси Z , 6 – индикаторная головка, 7 – лазер, 8 – поверочный угольник в положении измерения отклонений от прямолинейности в пл. $Y_2O_2Z_2$, 9 – линия измере-

ния отклонений от прямолинейности в пл. $X_2O_2Z_2$, 10 – оптический отражатель, 11 – шпиндельная бабка.

Аналогично, как при рассмотрении механизма «Станина (1) → X салазки (2)» и «Салазки (2) → Y стойка (3)», мы должны начало координат O_3 поместить на линию измерения отклонений позиционирования вдоль оси Z_2 . Рабочие плоскости поверочного угольника также должны проходить через линию измерения отклонений позиционирования.

Линии измерений отклонений от прямолинейности в двух плоскостях $X_3O_3Y_3$ и $X_3O_3Z_3$ (линии перемещения измерительных наконечников головок) должны лежать в одной плоскости. Начало координат $O_3(X_3, Y_3, Z_3)$ находится в точке P пересечения линий измерения.

При движении шпиндельной бабки по направляющим стойки существуют следующие первичные отклонения:

$\delta_z(z_2)$ - отклонения позиционирования шпиндельной бабки в функции координаты z_2 при её движении вдоль оси Z_2 (EZZ),

$\delta_x(z_2)$ – отклонения от прямолинейности движения шпиндельной бабки в пл. $X_2O_2Z_2$ (EXZ),

$\delta_y(z_2)$ - отклонения от прямолинейности движения шпиндельной бабки в плоскости $Y_2O_2Z_2$ (EYZ),

$\alpha_x(z_2)$ – поворот вокруг оси X_2 при движении шпиндельной бабки вдоль оси Z_2 (EAZ),

$\alpha_y(z_2)$ – поворот вокруг оси Y_2 , при движении шпиндельной бабки вдоль оси Z_2 (EBZ),

$\alpha_z(z_2)$ - поворот вокруг оси Z_2 при движении шпиндельной бабки вдоль оси Z_2 (ECZ).

Указанные отклонения $\delta_z(z_2)$, $\delta_x(z_2)$, $\delta_y(z_2)$, $\alpha_x(z_2)$, $\alpha_y(z_2)$, $\alpha_z(z_2)$ являются исходными данными для построения матрицы перехода из системы координат $O_3 (X_3, Y_3, Z_3)$ в систему $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ и обратно. Кроме того, необходимо

учитывать взаимосвязь систем координат $O_2 (X_2, Y_2, Z_2)$, $O_3 (X_3, Y_3, Z_3)$ через отклонения от перпендикулярности θ_{yz} и θ_{xz} .

$$\overline{r_2} = A_{2,3} \overline{r_3}, \quad \overline{r_3} = A_{2,3}^{-1} \overline{r_2}, \quad A_{2,3}^{-1} = \text{inv} (A_{2,3}).$$

Матрица перехода $A_{2,3}$ вычисляется с учетом, что $\overline{O_2 O_3}$ - вектор смещения начала координат системы $O_3(X_3, Y_3, Z_3)$ в системе $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$.

$$\overline{O_2 O_3} = \begin{pmatrix} X_{23} \\ Y_{23} \\ Z_{23} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A_{23} = \begin{pmatrix} 100 & X_{23} + \delta_x(z_2) \\ 010 & Y_{23} + \delta_y(z_2) \\ 001 & Z_{23} + \delta_z(z_2) \\ 000 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_x(z_2) + \theta_{yz}) - \sin(\alpha_x(z_2) + \theta_{yz})0 \\ 0 & \sin(\alpha_x(z_2) + \theta_{yz}) & \cos(\alpha_x(z_2) + \theta_{yz})0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\alpha_y(z_2) + \theta_{zx}) & 0 & \sin(\alpha_y(z_2) + \theta_{zx})0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha_y(z_2) + \theta_{zx}) & 0 & \cos(\alpha_y(z_2) + \theta_{zx})0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \cos \alpha_z(z_2) - \sin \alpha_z(z_2) & 0 & 0 \\ \sin \alpha_z(z_2) & \cos \alpha_z(z_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

3.2.1.5. Управляемый по программе механизм «Станина (1)→ В корпус планшайбы (5)»

Выходное звено - корпус планшайбы (поворотный стол) вращается в подшипниках, расположенных в станине. С помощью корпуса планшайбы реализуется поворот по координате В. С ним связана система координат $O_4 (X_4, Y_4, Z_4)$. Ось вращения поворотного стола номинально должна быть параллельна оси Y_0 (перпендикулярна плоскости $X_0 O_0 Y_0$).

Аналогично, как при рассмотрении механизмов линейных перемещений, начало координат $O_4(X_4, Y_4, Z_4)$ должно находиться в точке пересечения линий измерения (рис. 3.7) аксиального и радиального биения.

Здесь: 1 - станина, 2 – корпус планшайбы, 3 - линия измерения аксиального биения ЕУВ, 4 индикаторная головка, 5 - линия измерения радиального биения ЕХВ, 6 - линия измерения радиального биения ЕЗВ.

При любом другом расположении начала координат $O_4(X_4, Y_4, Z_4)$ необходимо будет пересчитывать отклонения аксиального и радиального биения в соответствии с измеренными значениями углов разворота корпуса планшайбы вокруг X, Y, Z , координат линий измерения и координат осей разворота. Измерение координат осей разворота корпуса планшайбы является такой же сложной метрологической задачей, как и в случае движения ползуна.

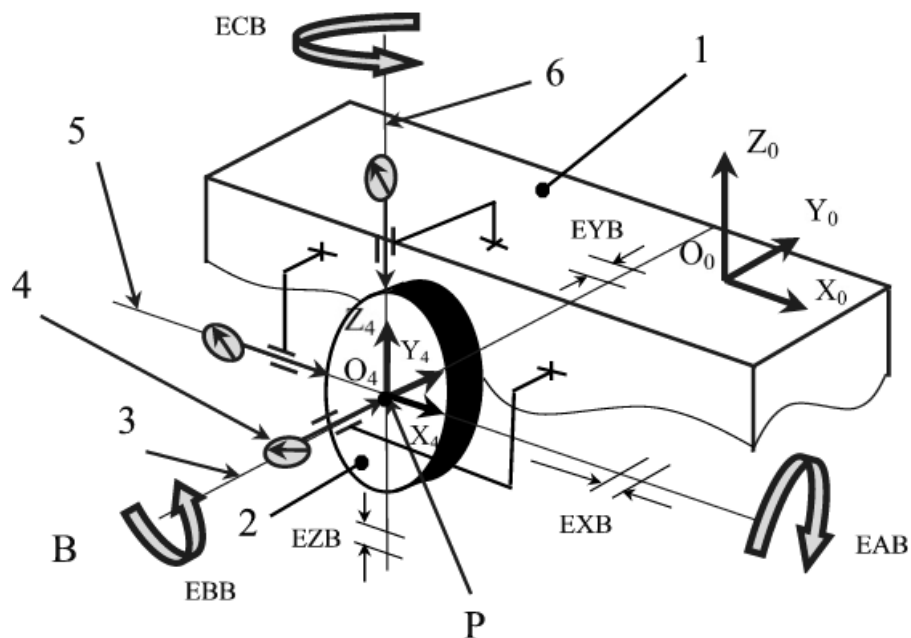


Рис. 3.7. Схема измерений первичных отклонений в подсистеме «Станина (1) → корпус планшайбы (5)»

При повороте стола на заданный угол существуют следующие первичные отклонения, определяющие отклонения стола относительно станины (Глава II, вращательная пара, [92]):

$\delta_\varphi(\varphi_b)$ - отклонение позиционирования корпуса планшайбы по угловой координате B (EBB),

$\delta_\psi(\varphi_b)$ - аксиальное биение корпуса планшайбы, (EYB - отклонение по оси Y_0 при вращении корпуса планшайбы),

$\delta_\xi(\varphi_b)$ - радиальное биение корпуса планшайбы, (EXB - смещение оси поворота В по координате X_0 , эксцентриситет),

$\delta_\zeta(\varphi_b)$ - радиальное биение корпуса планшайбы, (EZB - смещение оси поворота В по координате Z_0 , эксцентриситет),

$\psi_{byx}(\varphi_b)$ - разворот оси поворота В корпуса планшайбы в плоскости $Y_0O_0X_0$, (ECB),

$\psi_{byz}(\varphi_b)$ - разворот оси поворота В корпуса планшайбы в плоскости $Y_0O_0Z_0$, (EAB),

Указанные отклонения $\delta_\varphi(\varphi_b)$, $\delta_y(\varphi_b)$, $\delta_x(\varphi_b)$, $\delta_z(\varphi_b)$, $\psi_{byx}(\varphi_b)$, $\psi_{byz}(\varphi_b)$ являются исходными данными для построения матрицы перехода из системы координат $O_4(X_4, Y_4, Z_4)$ в систему $O_0(X_0, Y_0, Z_0)$ и обратно

$$\bar{r}_0 = A_{0,4} \bar{r}_4, \quad \bar{r}_4 = A_{0,4}^{-1} \bar{r}_0, \quad A_{0,4}^{-1} = \text{inv}(A_{0,4}).$$

Согласование систем координат $X_0Y_0Z_0$, $X_4Y_4Z_4$ осуществляется следующими условиями:

- отклонением от перпендикулярности оси вращения В к плоскости $X_0O_0Z_0$, в плоскости $X_0O_0Y_0$, - углом θ_{bxy} (рис. 3.2),

- отклонением от перпендикулярности оси вращения В к плоскости $X_0O_0Z_0$, в плоскости $Y_0O_0Z_0$ - углом θ_{byz} .

Матрица перехода $A_{0,4}$ вычисляется с учетом, что $\overline{O_0O_4}$ - вектор смещения начала координат системы $O_4(X_4, Y_4, Z_4)$ в системе $O_0(X_0, Y_0, Z_0)$

$$A_{04} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{byz} + \psi_{byz}) & -\sin(\theta_{byz} + \psi_{byz}) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_{byz} + \psi_{byz}) & \cos(\theta_{byz} + \psi_{byz}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 100 & X_{04} + \delta_x(\varphi_b) & 0 & 0 \\ 010 & Y_{04} + \delta_y(\varphi_b) & 0 & 0 \\ 001 & Z_{04} + \delta_z(\varphi_b) & 0 & 0 \\ 000 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \delta_\varphi(\varphi_b) & 0 & \sin \delta_\varphi(\varphi_b) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \delta_\varphi(\varphi_b) & 0 & \cos \delta_\varphi(\varphi_b) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\theta_{bxy} + \psi_{bxy}) & -\sin(\theta_{bxy} + \psi_{bxy}) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_{bxy} + \psi_{bxy}) & \cos(\theta_{bxy} + \psi_{bxy}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 01 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\overline{O_0 O_4} = \begin{pmatrix} X_{04} \\ Y_{04} \\ Z_{04} \\ 1 \end{pmatrix}$$

3.2.1.6. «Корпус планшайбы(5) → С планшайба (6)»

Выходное звено - планшайба вращается в подшипниках, расположенных в корпусе планшайбы. С помощью планшайбы реализуется поворот по координате С. С ней жёстко связана система координат $O_5 (X_5, Y_5, Z_5)$. Ось вращения планшайбы номинально должна быть перпендикулярна оси вращения поворотного стола В, и пересекаться с ней.

Аналогично, как при рассмотрении механизмов линейных перемещений и механизма «Станина (1) → В корпус планшайбы(5)», начало координат $O_5(X_5, Y_5, Z_5)$ должно находиться в точке пересечения линий измерения (рис. 3.8) аксиального и радиального биения.

При повороте планшайбы на заданный угол существуют следующие первичные отклонения механизма её поворота, определяющие отклонения планшайбы относительно корпуса:

$\delta_\varphi(\varphi_c)$ - отклонение позиционирования планшайбы по угловой координате С (ЕСС),

$\delta_z(\varphi_c)$ - аксиальное биение планшайбы, (ЕZС - отклонение по оси Z_4 при вращении корпуса планшайбы),

$\delta_x(\varphi_c)$ - радиальное биение планшайбы, (ЕХС - смещение оси поворота С по координате X_4 , эксцентриситет),

$\delta_y(\varphi_c)$ - радиальное биение планшайбы, (ЕУС - смещение оси поворота С по координате Y , эксцентриситет),

$\psi_{czx}(\varphi_c)$ - разворот оси поворота С планшайбы в плоскости $Z_4 O_4 X_4$, (ЕВС),

$\psi_{czy}(\varphi_c)$ - разворот оси поворота С планшайбы в плоскости $Z_4 O_4 Y_4$, (ЕАС).

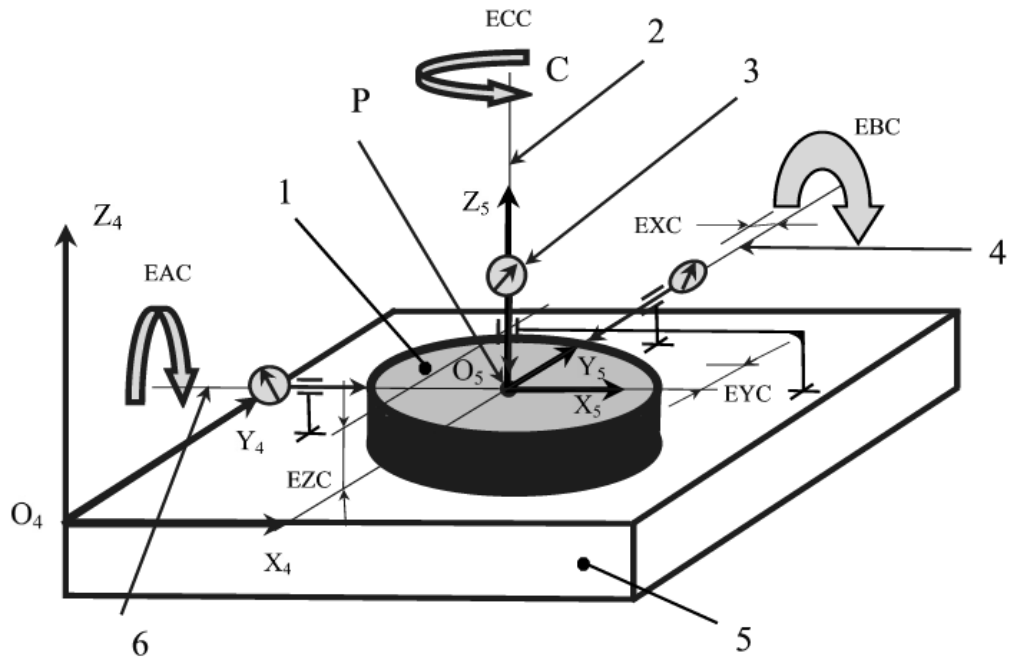


Рис. 3.8. Схема измерений первичных отклонений в подсистеме «Корпус планшайбы (5) → планшайба (6)»

Здесь: 1 – планшайба, 2 - линия измерения аксиального биения EZC, 3 - индикаторная головка, 4 - линия измерения радиального биения EYC в направлении оси Y, 5 - корпус планшайбы, 6 - линия измерения радиального биения EXC в направлении оси X.

Согласование систем координат $X_4Y_4Z_4$ и $X_5Y_5Z_5$ осуществляется следующими условиями:

- отклонением от перпендикулярности оси В и С – углом θ_{bc} (рис. 3.2),
- отклонением от пересечения осей В и С – отклонением Δ_{bcx} в направлении оси O_5X_5 и отклонением Δ_{bcz} – смещение оси В от плоскости планшайбы в направлении оси O_5Z_5 .

Указанные отклонения $\delta_\varphi(\varphi_c)$, $\delta_z(\varphi_c)$, $\delta_x(\varphi_c)$, $\delta_y(\varphi_c)$, $\psi_{czx}(\varphi_2)$, $\psi_{czy}(\varphi_2)$, θ_{bxy} , θ_{byz} , θ_{bc} , Δ_{bcx} , Δ_{bcz} являются исходными данными для построения матрицы перехода из системы координат $O_5(X_5, Y_5, Z_5)$ в систему $O_4(X_4, Y_4, Z_4)$ и обратно.

$$\bar{r}_4 = A_{4,5} \bar{r}_5, \quad \bar{r}_5 = A_{4,5}^{-1} \bar{r}_4, \quad A_{4,5}^{-1} = inv(A_{4,5})$$

Матрица перехода $A_{4,5}$ вычисляется с учетом, что $\overline{O_4O_5}$ - вектор смещения начала координат системы $O_5 (X_5, Y_5, Z_5)$ в системе $O_4 (X_4, Y_4, Z_4)$

$$\overline{O_4O_5} = \begin{pmatrix} X_{45} \\ Y_{45} \\ Z_{45} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A_{45} = \begin{pmatrix} 100 & X_{45} + \delta_x(\varphi_c) + \Delta_{bcx} \\ 010 & Y_{45} + \delta_y(\varphi_c) \\ 001 & Z_{45} + \delta_z(\varphi_c) + \Delta_{bcz} \\ 000 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{bc} + \psi_{cyz}(\varphi_c)) - \sin(\theta_{bc} + \psi_{cyz}(\varphi_c)) & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\theta_{bc} + \psi_{cyz}(\varphi_c)) & \cos(\theta_{bc} + \psi_{cyz}(\varphi_c)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \cos\psi_{czx} & 0 & \sin\psi_{czx} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\psi_{czx} & 0 & \cos\psi_{czx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\delta_\varphi(\varphi_c)) - \sin(\delta_\varphi(\varphi_c)) & 0 & 0 \\ \sin(\delta_\varphi(\varphi_c)) & \cos(\delta_\varphi(\varphi_c)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

3.2.2. Интегральное отклонение позиционирования $\overline{\delta_{\Sigma 1}}$ шпинделя относительно станины

Интегральное отклонение позиционирования $\overline{\delta_{\Sigma 1}}$ шпинделя получим следующим образом.

Предположим, что имеется точка $P_{и}$, принадлежащая режущей кромке фрезы, установленной в шпинделе станка. Будем различать $P_{иd}$ – точка в случае действительного станка с присущими ему первичными отклонениями и $P_{и3}$ – точка в случае абстрактного (идеального) станка с нулевыми первичными отклонениями. Вектор $\overline{O_0P_{иd}}$ определяет точку $P_{иd}$ в системе координат станины $O_0(X_0Y_0Z_0)$, а $\overline{O_0P_{и3}}$ определяет точку $P_{и3}$ в этой же системе координат.

На рис. 3.8 представлена схема перехода из системы координат станины в систему координат шпиндельной бабки как для действительного станка ($O_0(X_0Y_0Z_0) \rightarrow O_1(X_1Y_1Z_1) \rightarrow O_2(X_2Y_2Z_2) \rightarrow O_3(X_3Y_3Z_3)$), так и для идеального станка ($O'_0(X'_0Y'_0Z'_0) \rightarrow O'_1(X'_1Y'_1Z'_1) \rightarrow O'_2(X'_2Y'_2Z'_2) \rightarrow O'_3(X'_3Y'_3Z'_3)$).

Принимая во внимание, что вектор $\overline{O'_3P_{и3}}$ в системе координат $O'_3(X'_3Y'_3Z'_3)$ имеет те же координаты, что и вектор $\overline{O_3P_{и3}}$ в системе координат $O_3(X_3Y_3Z_3)$, и начала систем координат $O_0(X_0Y_0Z_0)$ и $O'_0(X'_0Y'_0Z'_0)$ совпадают, вектор $\overline{\delta_{\Sigma 1}}$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} \overline{\delta_{\Sigma 1}} &= \overline{P_{и3}P_{и\delta}} = \overline{O_0P_{и\delta}} - \overline{O'_0P_{и3}} = A_{0,3}\overline{O_3P_{и\delta}} - A'_{0,3}\overline{O'_3P_{и3}} = \\ &= A_{0,3}\overline{O'_3P_{и3}} - A'_{0,3}\overline{O'_3P_{и3}} = (A_{0,3} - A'_{0,3})\overline{O'_3P_{и3}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Вектор $\overline{O'_3P_{и3}}$ будем считать заданным, а матрицы $A_{0,3}$, $A'_{0,3}$ вычисляются через первичные отклонения с использованием выражений (3.1-3.3).

3.2.3. Интегральное отклонение позиционирования $\overline{\delta_{\Sigma 2}}$ для планшайбы относительно станины

Аналогично предыдущему рассмотрению предположим, что имеется точка $P_{п}$, принадлежащая обрабатываемой детали (рис. 3.9), закреплённой в приспособлении, установленном на планшайбе. Будем различать $P_{пд}$ – точка в случае действительного станка с присущими ему первичными отклонениями и $P_{п3}$ – точка в случае абстрактного (идеального) станка с нулевыми первичными отклонениями. Точка $P_{п3}$ совпадает с точкой $P_{и3}$. Вектор $\overline{O_0P_{пд}}$ определяет точку $P_{пд}$ в системе координат станины $O_0(X_0Y_0Z_0)$, а $\overline{O_0P_{п3}}$ определяет точку $P_{п3}$ в этой же системе координат. На рис. 3.9 представлена схема перехода из системы координат станины в систему координат планшайбы как для действительного станка ($O_0(X_0Y_0Z_0) \rightarrow O_4(X_4Y_4Z_4) \rightarrow O_5(X_5Y_5Z_5)$), так и для идеального станка ($O_0(X_0Y_0Z_0) \rightarrow O'_4(X'_4Y'_4Z'_4) \rightarrow O'_5(X'_5Y'_5Z'_5)$).

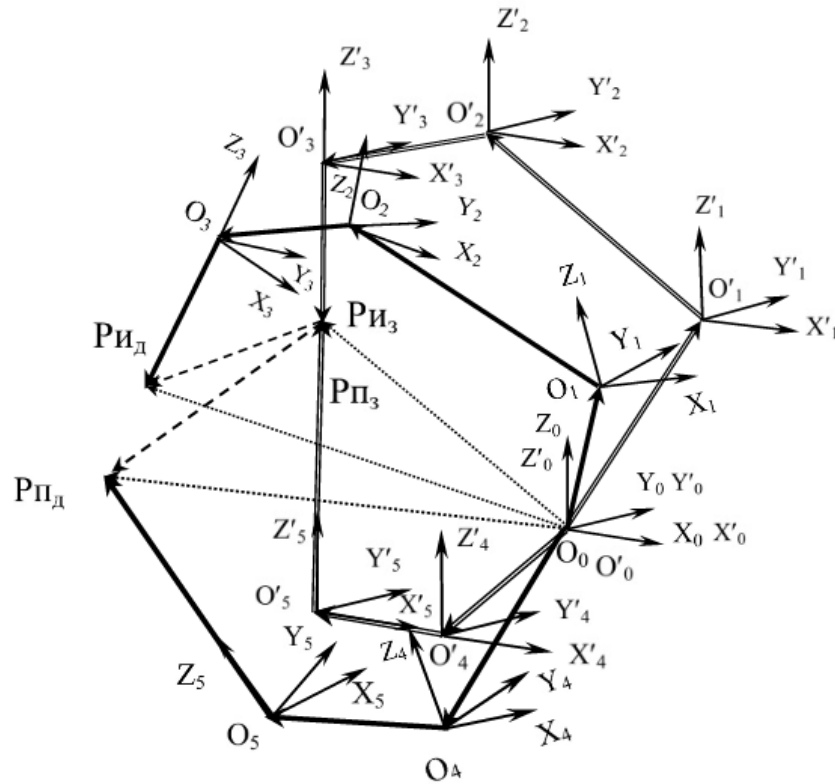


Рис. 3.9. Схема перехода из системы координат станины в систему координат шпиндельной бабки и в систему координат планшайбы для «действительного» и «идеального» станка

Принимая во внимание, что вектор $\overline{O'_5 P_{П3}}$ в системе координат $O'_5(X'_5 Y'_5 Z'_5)$ имеет те же координаты, что и вектор $\overline{O_5 P_{ПД}}$ в системе координат $O_5(X_5 Y_5 Z_5)$, и начала систем координат $O_0(X_0 Y_0 Z_0)$ и $O'_0(X'_0 Y'_0 Z'_0)$ совпадают, вектор $\overline{\delta_{\Sigma 2}}$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} \overline{\delta_{\Sigma 2}} &= \overline{P_{П3} P_{ПД}} = \overline{O_0 P_{ПД}} - \overline{O'_0 P_{П3}} = A_{0,5} \overline{O_5 P_{ПД}} - A'_{0,5} \overline{O'_5 P_{П3}} = \\ &= A_{0,5} \overline{O'_5 P_{П3}} - A'_{0,5} \overline{O'_5 P_{П3}} = (A_{0,5} - A'_{0,5}) \overline{O'_5 P_{П3}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Вектор $\overline{O'_5 P_{П3}}$ будем считать заданным, а матрицы $A_{0,5}$, $A'_{0,5}$ вычисляются через первичные отклонения с использованием выражений (3.4, 3.5).

3.2.4. Интегральное отклонение позиционирования $\overline{\delta_{\Sigma}}$ для 5-ти координатного станка (3 линейные и 2 угловые координаты)

Суммарное интегральное отклонение позиционирования полностью характеризуется двумя векторами $\overline{\delta_{\Sigma 1}}$ и $\overline{\delta_{\Sigma 2}}$, которые можно использовать для оценки отклонения взаимного позиционирования исполнительных органов машины (станка), так и как составляющая часть отклонения действительной траектории от заданной траектории.

Для процесса позиционирования интегральное отклонение может рассматриваться как разность векторов $\overline{\delta_{\Sigma 1}}$ и $\overline{\delta_{\Sigma 2}}$ (3.6,3.7)

$$\begin{aligned} \overline{\delta_{\Sigma}} &= \overline{\delta_{\Sigma 1}} - \overline{\delta_{\Sigma 2}} = \\ &= (A_{0,3} - A'_{0,3}) \overline{O'_3 P u_3} - (A_{0,5} - A'_{0,5}) \overline{O'_5 P n_3} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Компоненты вектора $\overline{\delta_{\Sigma}} = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ - линейные корректирующие поправки, которые должны вноситься в траекторию движения ИО станка.

Интегральные угловые отклонения ИО для данной схемы 5 координатного станка описываются простыми алгебраическими уравнениями.

$$\begin{aligned} \Delta A &= \alpha_{x\Sigma} = \alpha_{x\Sigma} I + \alpha_{x\Sigma} II, \\ \Delta B &= \alpha_{y\Sigma} = \alpha_{y\Sigma} I + \alpha_{y\Sigma} II, \\ \Delta C &= \alpha_{z\Sigma} = \alpha_{z\Sigma} I + \alpha_{z\Sigma} II. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Следует отметить, что коррекция линейных интегральных отклонений является необходимым и достаточным условием отсутствия методической погрешности формообразования лезвийным «точечным» инструментом при 3 ÷ 5 координатной обработке. При других видах формообразования (развертывании, сверлении, профильном фрезеровании и шлифовании и др.) необходима коррекция не только линейных интегральных отклонений шпинделя относительно стола, но и интегральных угловых отклонений.

3.3. Имитационная модель образования интегрального отклонения для 5-ти координатного станка

3.3.1. Построение имитационной модели

Численную (имитационную) модель удобно строить в среде Matlab, используя широкие возможности данного пакета при работе с матрицами и векторами.

Модель строится следующим образом.

I. Сначала формируется часть программы, в которой описываются исходные данные:

1) Первичные отклонения станка:

- $\delta_x(x_0), \delta_y(x_0), \delta_z(x_0), \alpha_x(x_0), \alpha_y(x_0), \alpha_z(x_0),$
- $\delta_x(y_1), \delta_y(y_1), \delta_z(y_1), \alpha_x(y_1), \alpha_y(y_1), \alpha_z(y_1),$
- $\delta_z(z_2), \delta_x(z_2), \delta_y(z_2), \alpha_x(z_2), \alpha_y(z_2), \alpha_z(z_2),$
- $\delta\varphi_1(\varphi_1), \delta_{y4}(\varphi_1), \delta_{x4}(\varphi_1), \delta_{z4}(\varphi_1), \psi_{1yox}(\varphi_1), \psi_{1yoz}(\varphi_1),$
- $\delta\varphi_2(\varphi_2), \delta_{z5}(\varphi_2), \delta_{x5}(\varphi_2), \delta_{y5}(\varphi_2), \psi_{2zox}(\varphi_2), \psi_{2zoy}(\varphi_2).$

2) Векторы перехода из одной подсистемы несущей системы станка в другую:

$$\overline{O_0O_1} = \begin{pmatrix} X_{01} \\ Y_{01} \\ Z_{01} \\ 1 \end{pmatrix} \quad \overline{O_1O_2} = \begin{pmatrix} X_{12} \\ Y_{12} \\ Z_{12} \\ 1 \end{pmatrix} \quad \overline{O_2O_3} = \begin{pmatrix} X_{23} \\ Y_{23} \\ Z_{23} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\overline{O_4O_5} = \begin{pmatrix} X_{45} \\ Y_{45} \\ Z_{45} \\ 1 \end{pmatrix} \quad \overline{O_0O_4} = \begin{pmatrix} X_{04} \\ Y_{04} \\ Z_{04} \\ 1 \end{pmatrix}$$

3) Взаимосвязь систем координат $O_1 (X_1, Y_1, Z_1)$, $O_2 (X_2, Y_2, Z_2)$, $O_3 (X_3, Y_3, Z_3)$:

- отклонение от перпендикулярности θ_{xy}
- отклонение от перпендикулярности θ_{yz}
- отклонение от перпендикулярности θ_{zx} .

Взаимосвязь систем координат $X_0Y_0Z_0$, $X_4Y_4Z_4$ и $X_5Y_5Z_5$:

- отклонение от перпендикулярности оси вращения к плоскости $X_0O_0Z_0$, в плоскости $X_0O_0Y_0$, - углом θ_{bxy} ,
- отклонение от перпендикулярности оси вращения к плоскости $X_0O_0Z_0$, в плоскости $Y_0O_0Z_0$ - углом θ_{byz} ,

- отклонение от перпендикулярности осей В и С – углом θ_{bc}
- отклонение от пересечения осей В и С:
- отклонением Δ_{bcx} в направлении оси O_5X_5
- отклонением Δ_{bcz} (смещение оси В от плоскости планшайбы в направлении оси Z).

II. Программируется процедура вычисления суммарного отклонения $\overline{\delta}_\Sigma$ (i) для заданного номера точки на траектории движения $i = 1 \dots N$ и $(x_i, y_i, z_i, \varphi_{1i}, \varphi_{2i})$ в соответствии с уравнением (3.8)

III. Строится алгоритм обхода аргумента i для решения задачи анализа, например, влияния отдельных первичных отклонений на суммарное отклонение, либо задачи синтеза (построения) алгоритма ввода коррекции для компенсации влияния первичных отклонений станка на суммарное отклонение $\overline{\delta}_\Sigma$ (i). Эта часть модели строится исходя из основной задачи, для решения которой создается имитационная модель.

IV. Строится процедура отображения отклонение $\overline{\delta}_\Sigma$ (i), удобного для решения поставленной задачи анализа точности или синтеза алгоритма коррекции.

В следующем параграфе рассмотрены результаты применения разработанной имитационной модели вычисления суммарного отклонения $\overline{\delta}_\Sigma$ (i) для решения задачи анализа влияния отдельных первичных отклонений на суммарное отклонение при обходе эталонной окружности.

Текст программы [112] представлен в ПРИЛОЖЕНИИ № 1.

На рис. 3.10 представлена блок-схема программы вычисления интегрированного отклонения положения исполнительных органов многокоординатного станка при обходе последовательности точек заданной траектории.

3.3.2. Опробование имитационной модели на частных случаях формирования интегрального отклонения по первичным отклонениям для структуры станка мод. МС – 300

Ниже представлены результаты опробования имитационной модели при формировании интегрального отклонения при обходе эталонной окружности $R = 150$ мм, расположенной в плоскости XU с центром $X = -200$ мм и $U = -150$.

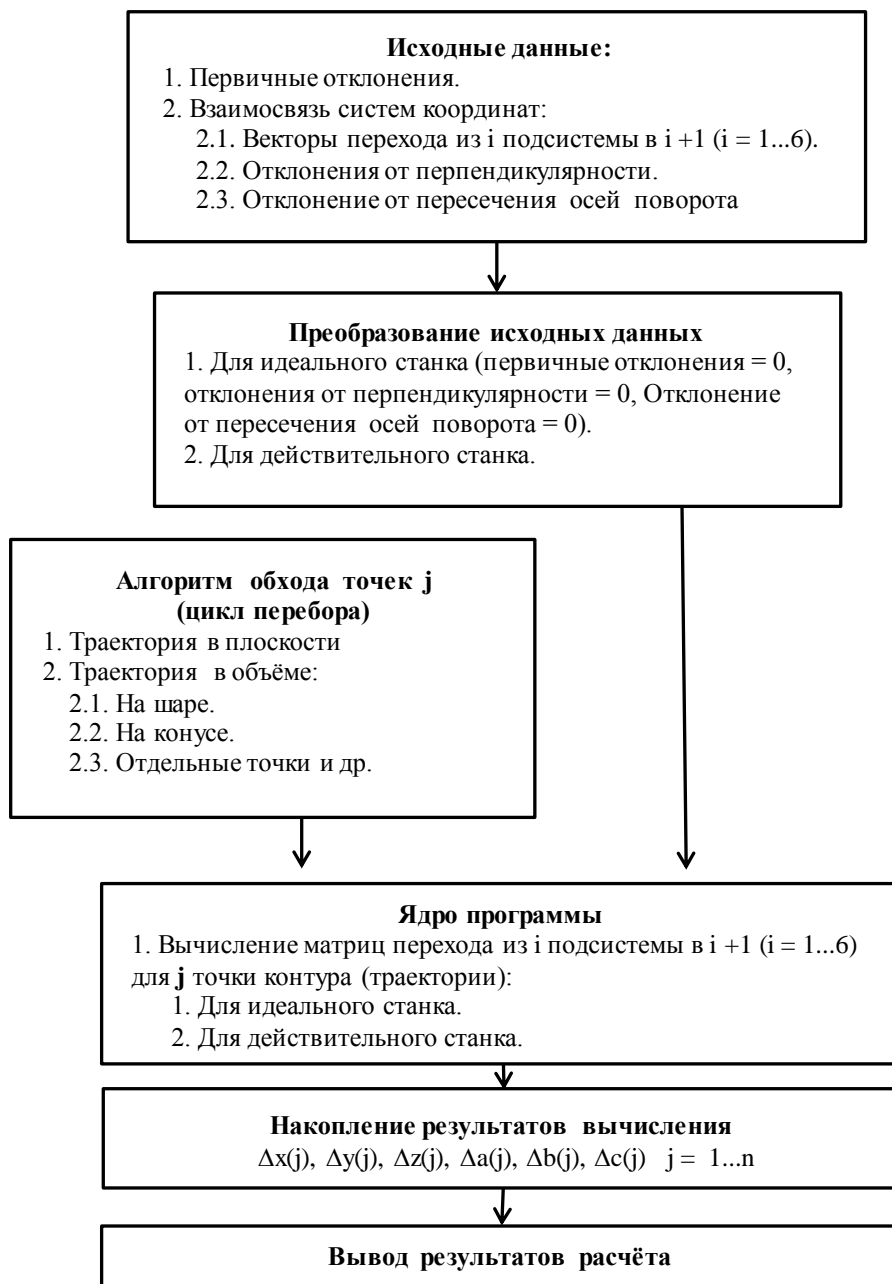


Рис. 3.10. блок-схема программы вычисления отклонений исполнительных органов многокоординатной машины с ЧПУ

На рис. 3.11 представлены результаты отклонений по радиус-вектору при наличии среди первичных отклонений только отклонений позиционирования по координате Y , линейно меняющихся и представленных на рис. 3.12. Здесь и далее: 1 – эталонная окружность, 2 – кривая отклонений от эталонной окружности.

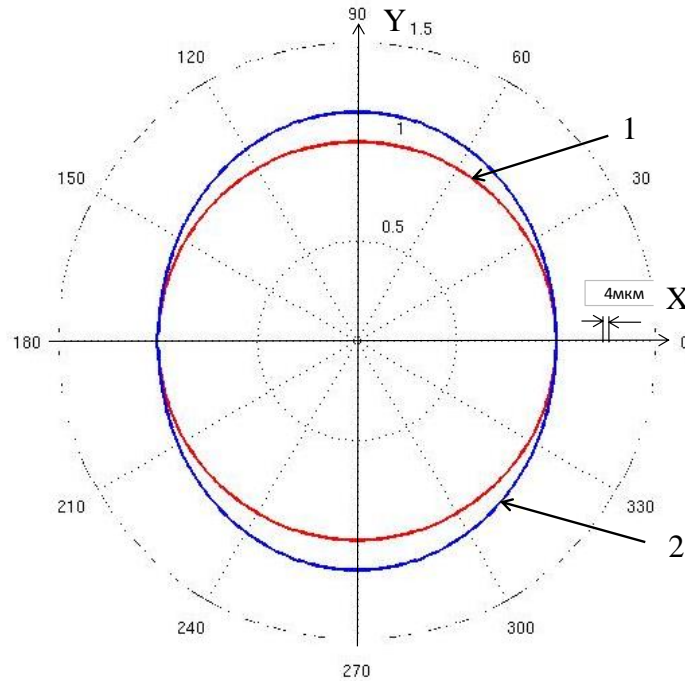


Рис. 3.11. Отклонения по радиус-вектору при обходе окружности $R = 150$ мм при точности позиционирования по координате Y , соответствующей рис. 3.12 и нулевых отклонениях по координате X

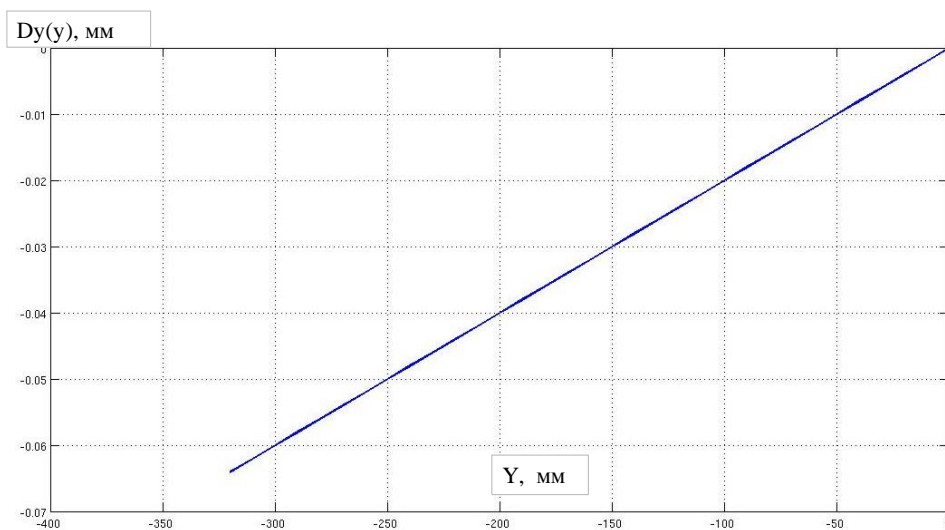


Рис. 3.12. Отклонения позиционирования $Dy(y)$ (E_{YY}) по координате Y

На рис. 3.13 представлены интегральные отклонения по радиус-вектору при отклонениях позиционирования по координате X и Y , меняющихся по законам, представленным на рис. 3.14.

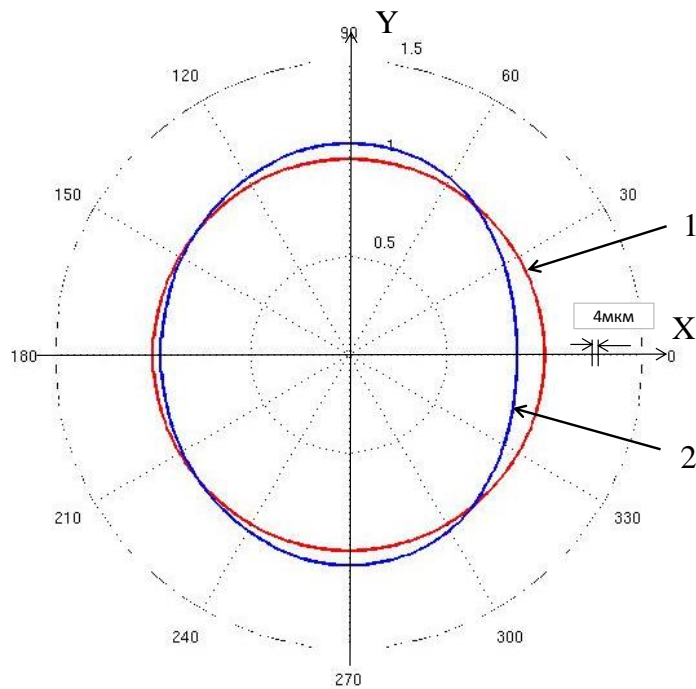


Рис. 3.13. Отклонения по радиус-вектору при обходе окружности $R = 150$ мм при точности позиционирования по координате X и Y , соответствующей рис. 3.14

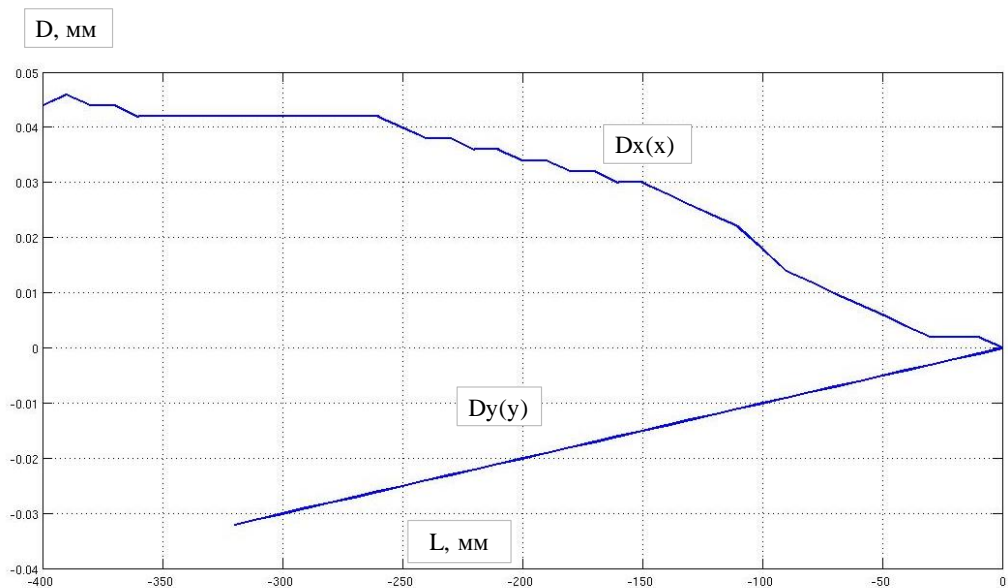


Рис. 3.14. Отклонения позиционирования $Dx(x)$ (E_{XX}) по координате X и $Dy(y)$ (E_{YY}) по координате Y

На рис. 3.15 показано влияние на интегральное отклонение по радиус-вектору от прямолинейности движения $Dy(x)$ (EYX) по координате X , изменяющихся по закону в соответствии с рис. 3.16.

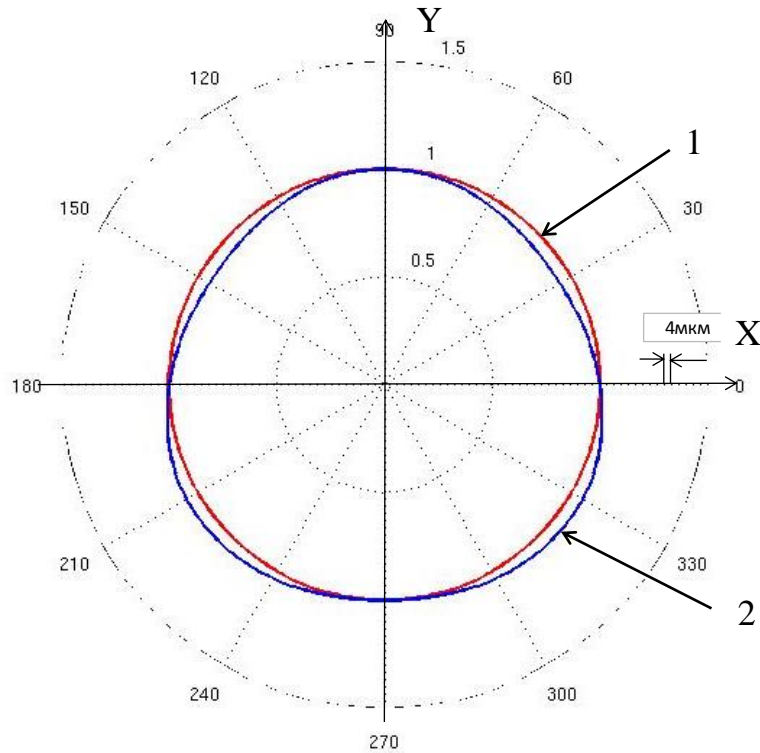


Рис. 3.15. Отклонения по радиус-вектору при обходе окружности $R = 150$ мм при отклонениях от прямолинейности движения по координате X в соответствии с рис. 3.16

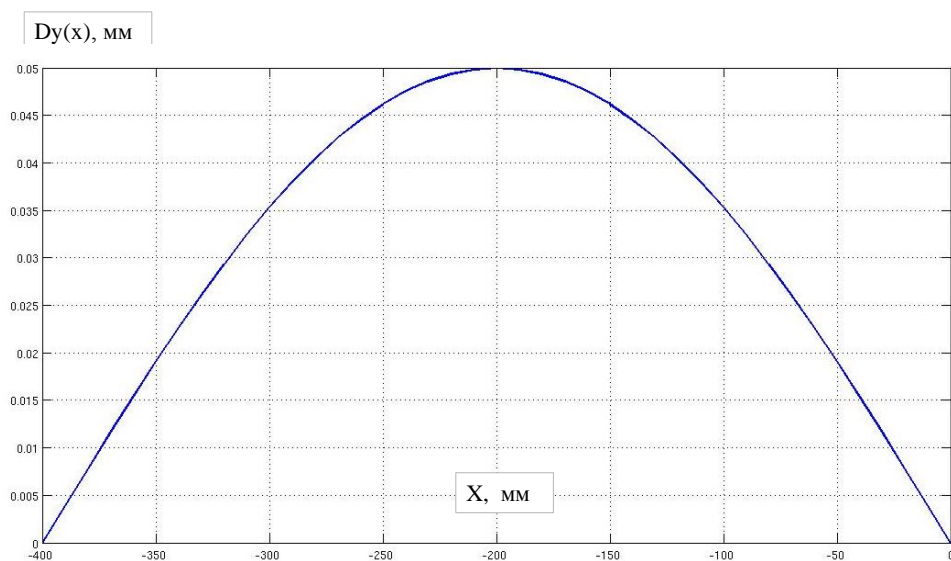


Рис. 3.16. Отклонения от прямолинейности движения $Dy(x)$ (EYX) по координате X

На рис. 3.17 показано влияние на интегральное отклонение по радиус-вектору от прямолинейности движения $Dx(y)$ (EXY) по координате Y , изменяющихся по закону в соответствии с рис. 3.18.

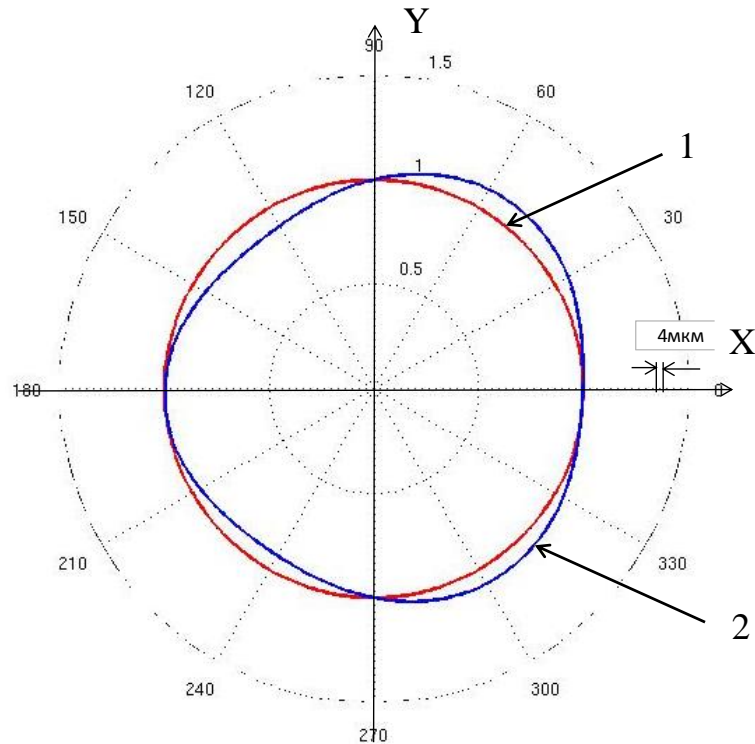


Рис. 3.17. Отклонения по радиус-вектору при обходе окружности $R = 150$ мм при отклонениях от прямолинейности движения по координате Y в соответствии с рис. 3.18

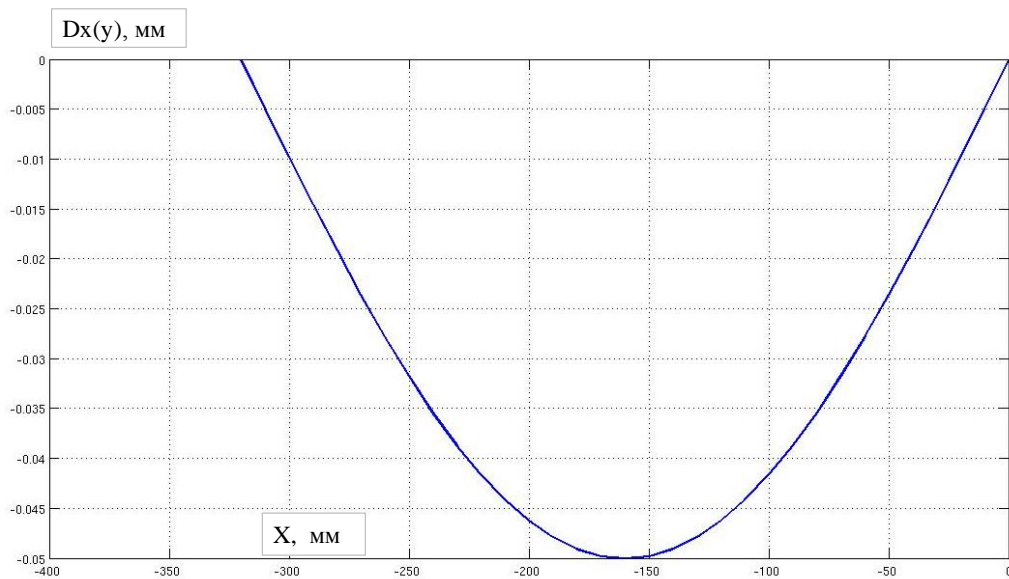


Рис. 3.18. Отклонения от прямолинейности движения $Dx(y)$ (EXY) по координате Y

Влияние отклонений от прямолинейности движения по двум координатам $Dy(x)$ (EYX) и $Dx(y)$ (EXY), изменяющихся в соответствии с рис. 3.20, на интегральное отклонение по радиус-вектору представлено на рис. 3.19.

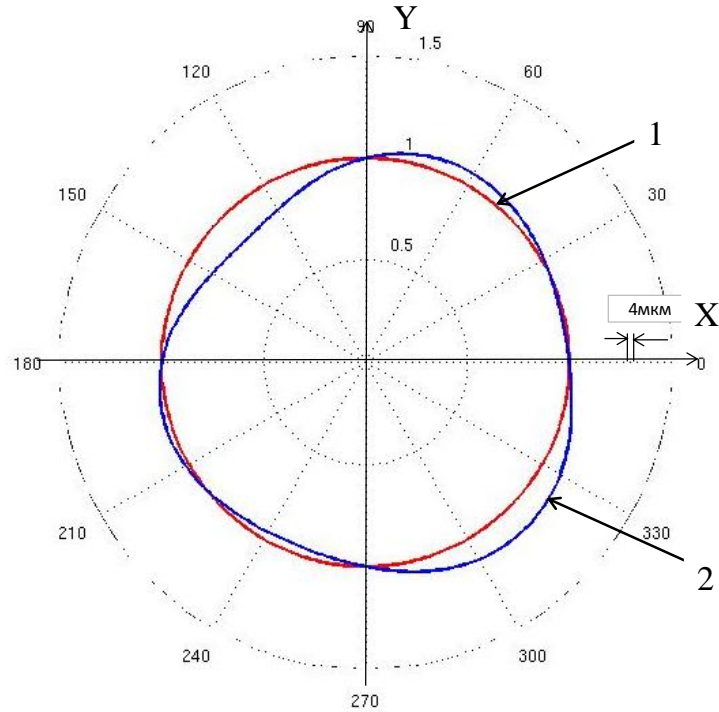


Рис. 3.19. Отклонения по радиус-вектору при обходе окружности $R = 150$ мм при отклонениях от прямолинейности движения по координате X и Y в соответствии с рис. 3.20

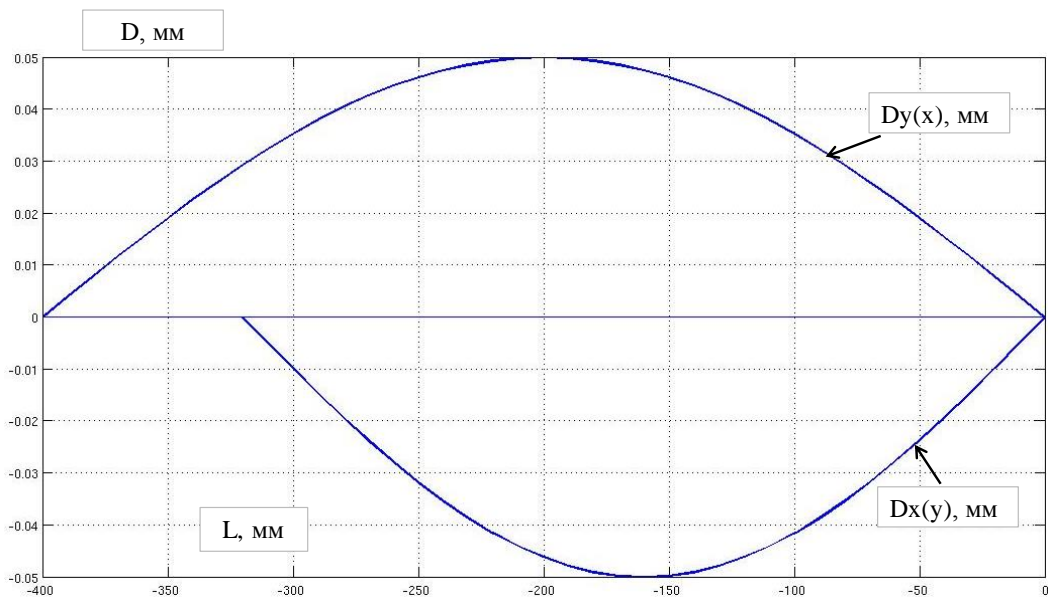


Рис. 3.20. Отклонения от прямолинейности движения $Dx(y)$ (EXY) по координате Y и $Dy(x)$ (EYX) по координате X

На рис. 3.21 показано интегральное отклонение при наличии одновременно отклонений позиционирования по координатам X и Y и отклонений от прямолинейности $Dy(x)$ (EYX) и $Dx(y)$ (EXY) в соответствии с рис. 3.22.

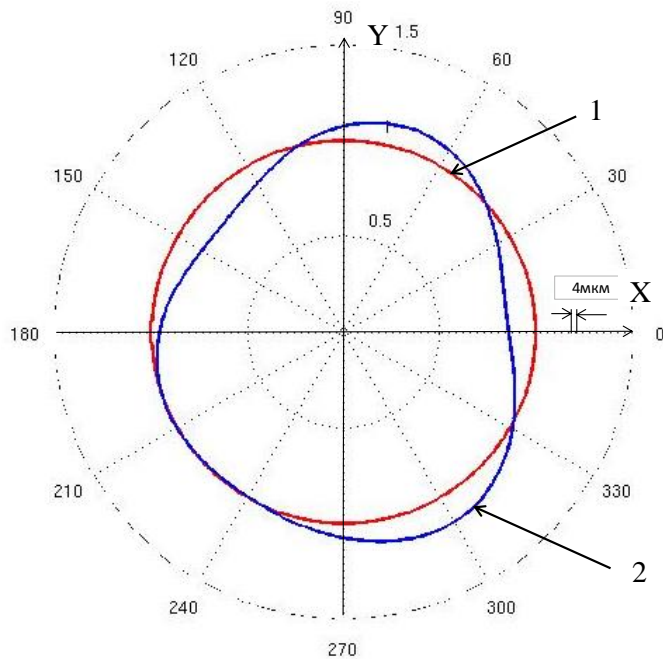


Рис. 3.21. Отклонения по радиус-вектору при обходе окружности $R = 150$ мм при отклонениях в соответствии с рис. 3.22

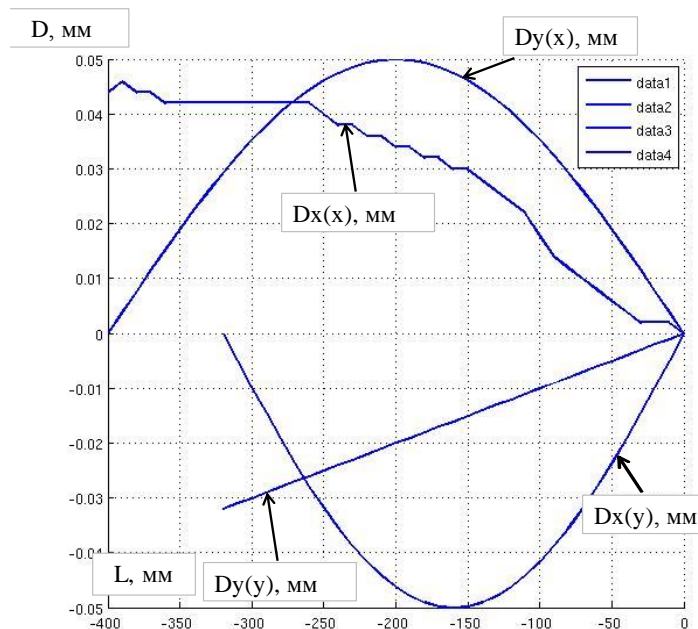


Рис. 3.22. Отклонения позиционирования $Dx(x)$ (E_{XX}) и $Dy(y)$ (E_{YY}) по координатам X и Y и отклонения от прямолинейности движения $Dx(y)$ (E_{XY}) по координате Y и $Dy(x)$ (E_{YX}) по координате X

Из представленной серии рисунков при постепенном наложении различных первичных отклонений отчётливо видно «усложнение» в поведении кривой интегрального отклонения.

На рис. 3.23, а) показано отклонение от эталонной окружности при наличии среди первичных отклонений только отклонений $\theta_{xy} = 100''$ от перпендикулярности в плоскости XY, а на рис. 3.23, б) при отклонениях от перпендикулярности в другую сторону $\theta_{xy} = -100''$.

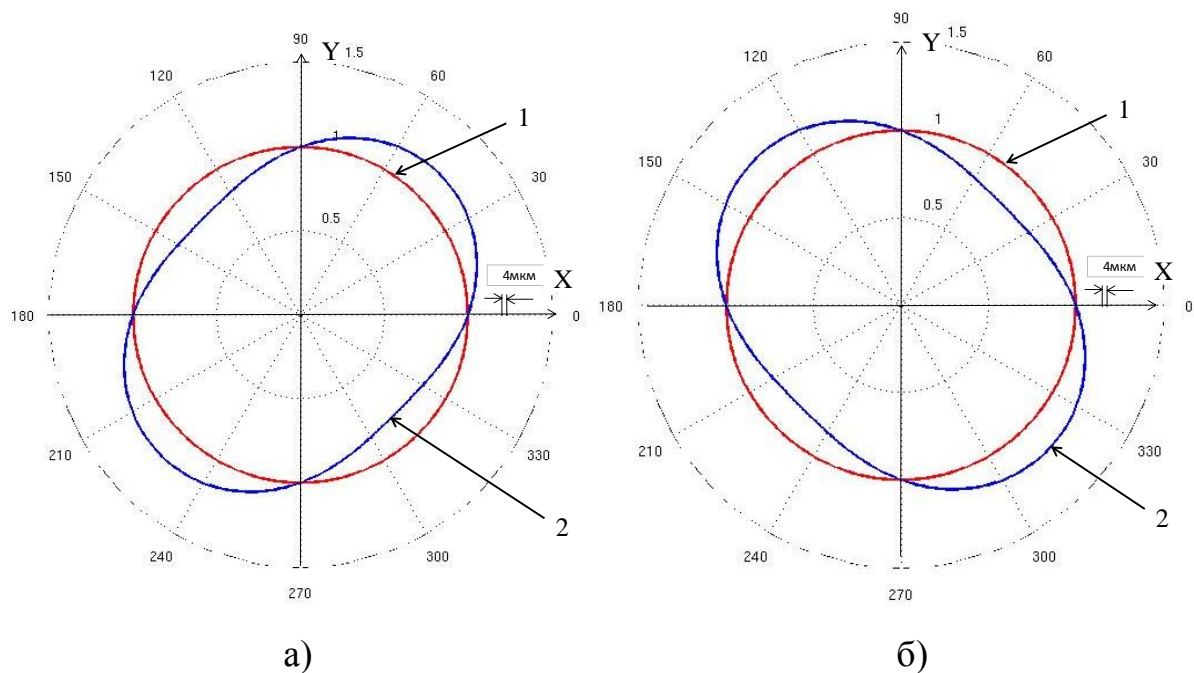


Рис. 3.23. Отклонения по радиус-вектору при обходе окружности $R = 150$ мм при отклонении от перпендикулярности: а) $\theta_{xy} = 100''$, б) $\theta_{xy} = -100''$

На рис. 3.24 показано как изменяется интегральное отклонение, показанное на рис. 3.21 при добавлении к первичным отклонениям в соответствии с рис. 3.22, б) отклонений от перпендикулярности $\theta_{xy} = -100''$.

Следует отметить, что влияние отклонений от перпендикулярности при движении по линейным координатам на интегральное отклонение в имитационной модели учитывается путём добавления соответствующих составляющих в первичные линейные отклонения. Например, для траектории в плоскости XY такими составляющими являются $dx = +y_k(i)\sin(\theta_{xy})$, которое суммируется с отклонением позиционирования по координате X и $dy = -y_k(i)(1-$

$\cos(\theta_{xy})$), суммируется с отклонением от прямолинейности движения стойки по координате Y (см. Приложение № 1).

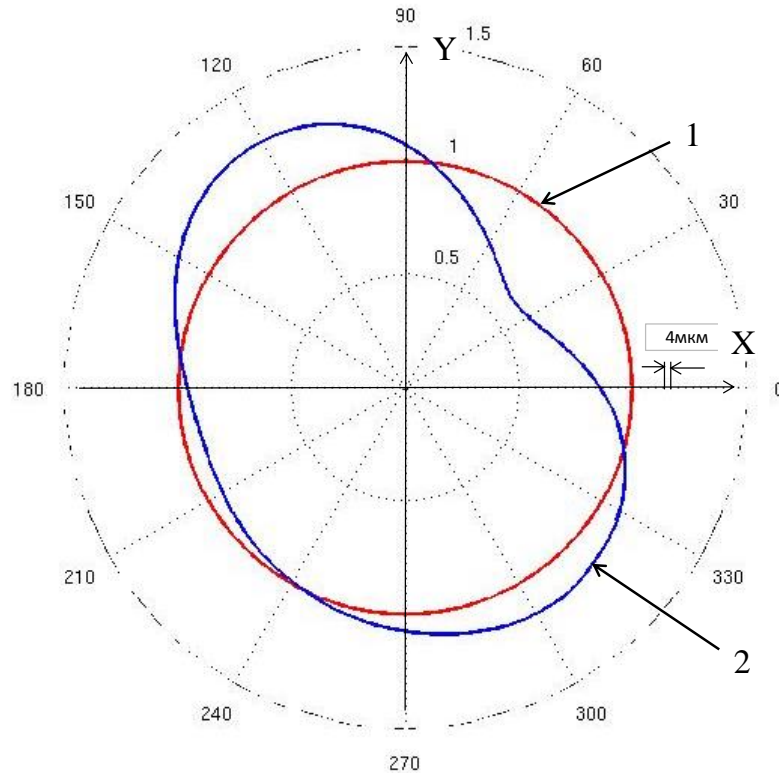


Рис. 3.24. Отклонения по радиус-вектору при обходе окружности $R = 150$ мм при отклонении от перпендикулярности $\theta_{xy} = -100''$ и отклонениях от прямолинейности и позиционирования в соответствии с рис. 3.22

3.3.3. Использование имитационной модели для анализа объёмной точности 5 координатного станка с поворотным глобусным столом мод. МС 300

Для проведения анализа и синтеза объёмной точности 5 координатного станка с поворотным глобусным столом имитационная модель psd0.m (ПРИЛОЖЕНИЕ № 1) была модифицирована в модель psd43.m (ПРИЛОЖЕНИЕ № 3).

3.3.3.1. Расчёт контрольных точек в рабочем пространстве 5 координатного станка с глобусным поворотным столом.

Объёмная точность определяется по интегральным отклонениям $\overline{\delta}_z(i)$ (i) в контрольных точках i ($i = 1, \dots, n$) (вопрос оценки объёмной точности подробно рассматривается в главе V).

Число контрольных точек n для оценки объёмной точности 5 координатного станка целесообразно выбирать из соображения равномерности распределения точек в диапазоне угловых координат.

Принимаем:

- 1) 12 положений планшайбы через 30° - $v_{fi} = 0:30:330$,
- 2) 5 положений корпуса планшайбы через 30° - $v_{pci} = 30:-30:-90$.

В результате имеем число контрольных точек $n = 60$.

v_{fi} – угловая координата планшайбы (С),

v_{pci} – угловая координата корпуса планшайбы (В).

Контрольную точку можно представить, как центр шара, располагаемого относительно центра планшайбы на расстоянии R_{H2} и на высоте относительно зеркала планшайбы $H2$. Для нашего случая выберем $R_{H2} = 120$ мм $H2 = 50$ мм.

Процедура определения линейных координат контрольных точек (x_{kk} , y_{kk} , z_{kk}) в среде matlab следующая:

```

for j=1:5
    for i=1:12
        vpcid(i) = atan(RH2*sin(krr*vfi(i))/H2);
        RB = sqrt((RH2*sin(krr*vfi(i)))^2+H2^2);
        xkk(i,j) = RB*sin(vpcid(i)+krr*vpci(j));
        ykk(i,j) = RH2*cos(krr*vfi(i));
        zkk(i,j) = RB*cos(vpcid(i)+krr*vpci(j));
        fiI(i,j) = vpci(j);
        fiII(i,j) = vfi(i);
    end
end

xkk=-xkk+X0;
ykk=-ykk+Y0;
zkk=zkk+Z0;

```

X_0 и Y_0 – координаты центра планшайбы в системе координатах станка.

Z_0 – координата центра шара (контрольной точки) в системе координат станка при горизонтальном положении планшайбы $v_{rci} = 0$ ($B = 0$).

Обход контрольных точек может происходить по различным алгоритмам, например, в зависимости от того, какая из угловых координат является ведущей (первой).

Так, если ведущей является координата B ($v_{rci} = 30:-30:-90$), а ведомой C ($v_{fi} = 0:30:330$), то картина положения контрольных точек напоминает тело вращения вокруг оси B (рис. 3.25, $X_0 = 0$, $Y_0 = 0$, $Z_0 = 0$).

В случае, если ведущей является координата C ($v_{fi} = 0:30:330$), а ведомой B ($v_{rci} = 30:-30:-90$), то картина обхода контрольных точек становится такой, как на рис. 3.26, ($X_0 = -300$, $Y_0 = -150$, $Z_0 = -130$).

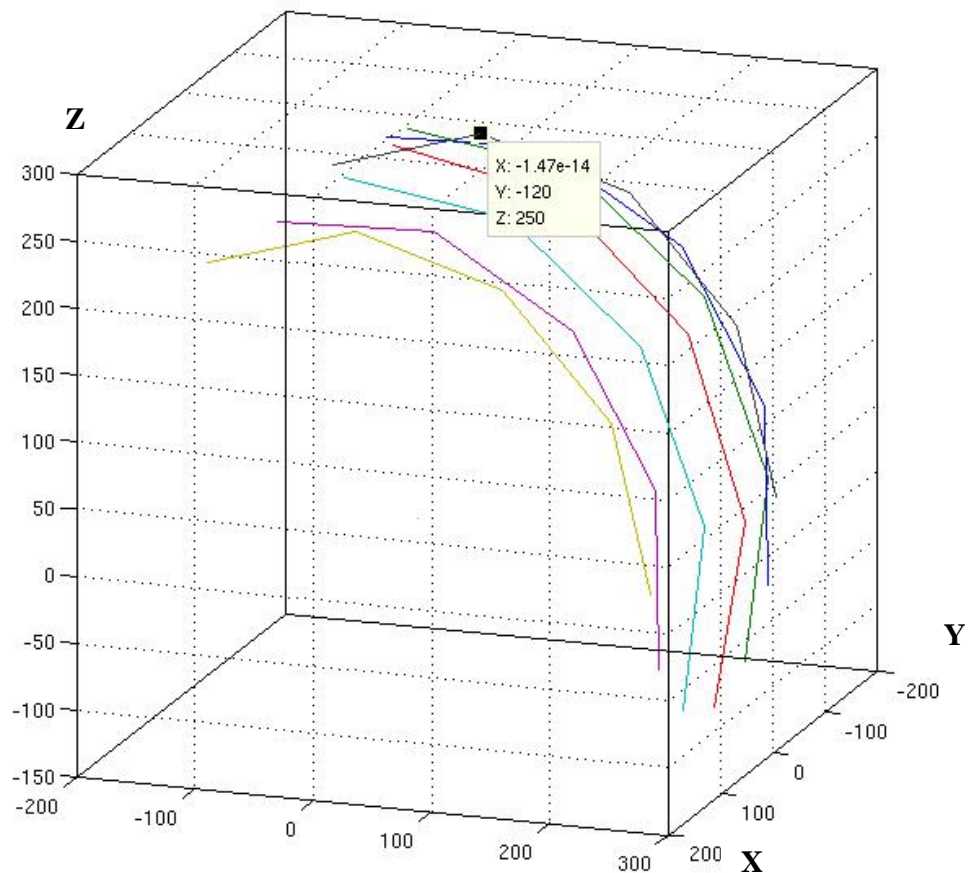


Рис. 3.25. Обход контрольных точек при ведущей координате C ($v_{fi} = 0:30:330$) и ведомой - B ($v_{rci} = 30:-30:-90$)

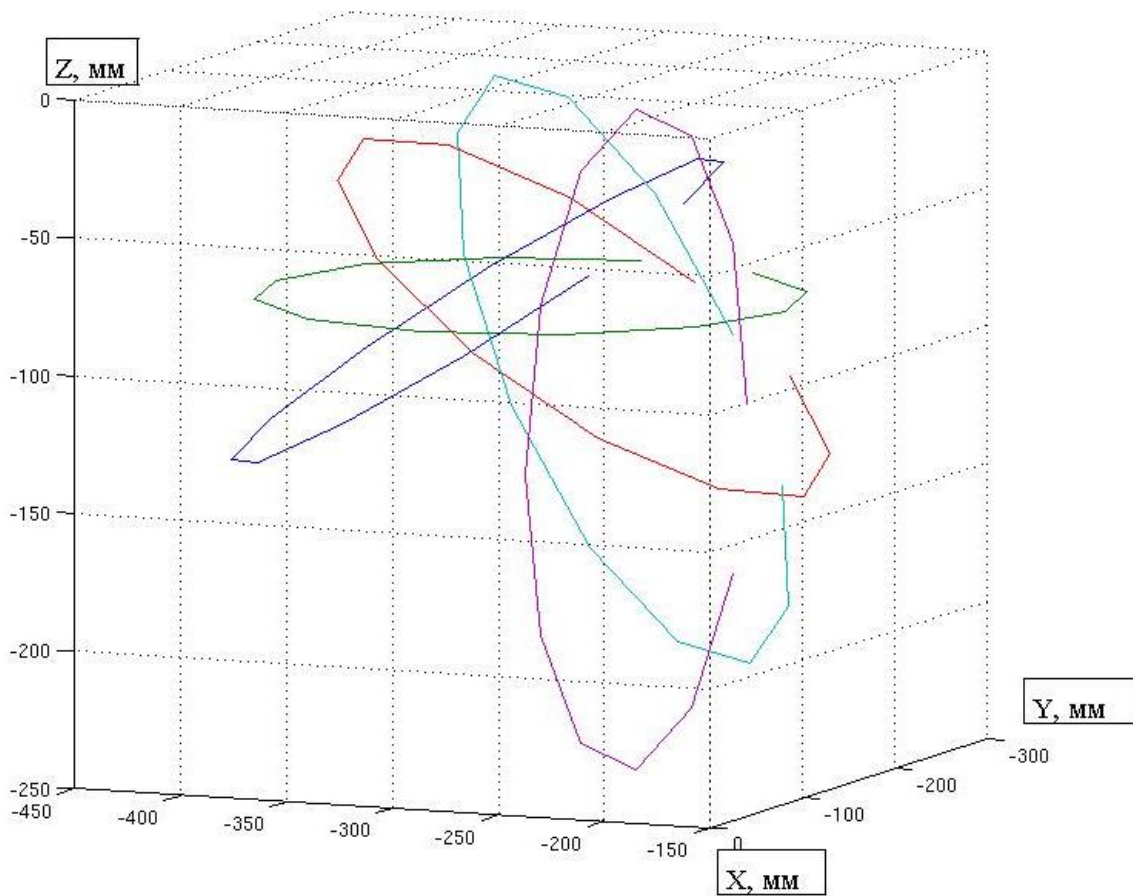


Рис. 3.26. Обход контрольных точек при ведущей координате В ($vrci = 30:-30:-90$) и ведомой - С ($vfi = 0:30:330$)

На наш взгляд наиболее удобной является вторая стратегия: ведущая координата - В ($vrci = 30:-30:-90$), а ведомая - С ($vfi = 0:30:330$). Для этого случая координаты контрольных точек ХК, YK, ZK, В, С представлены в ПРИЛОЖЕНИИ № 4.

Программа, представленная в ПРИЛОЖЕНИИ № 3, позволяет рассчитывать интегральное отклонение $DD = \{u, v, w\}$ в каждой контрольной точке рабочего пространства, как векторную сумму двух векторов: вектора отклонения инструмента DPA, и вектора отклонения заготовки DPB:

$$u=DPA(:,2)+DPB(:,2),$$

$$v=DPA(:,3)+DPB(:,3),$$

$$w=DPA(:,4)+DPB(:,4).$$

В качестве примера на рис. 3.27 показаны результаты расчёта интегрального отклонения DD .

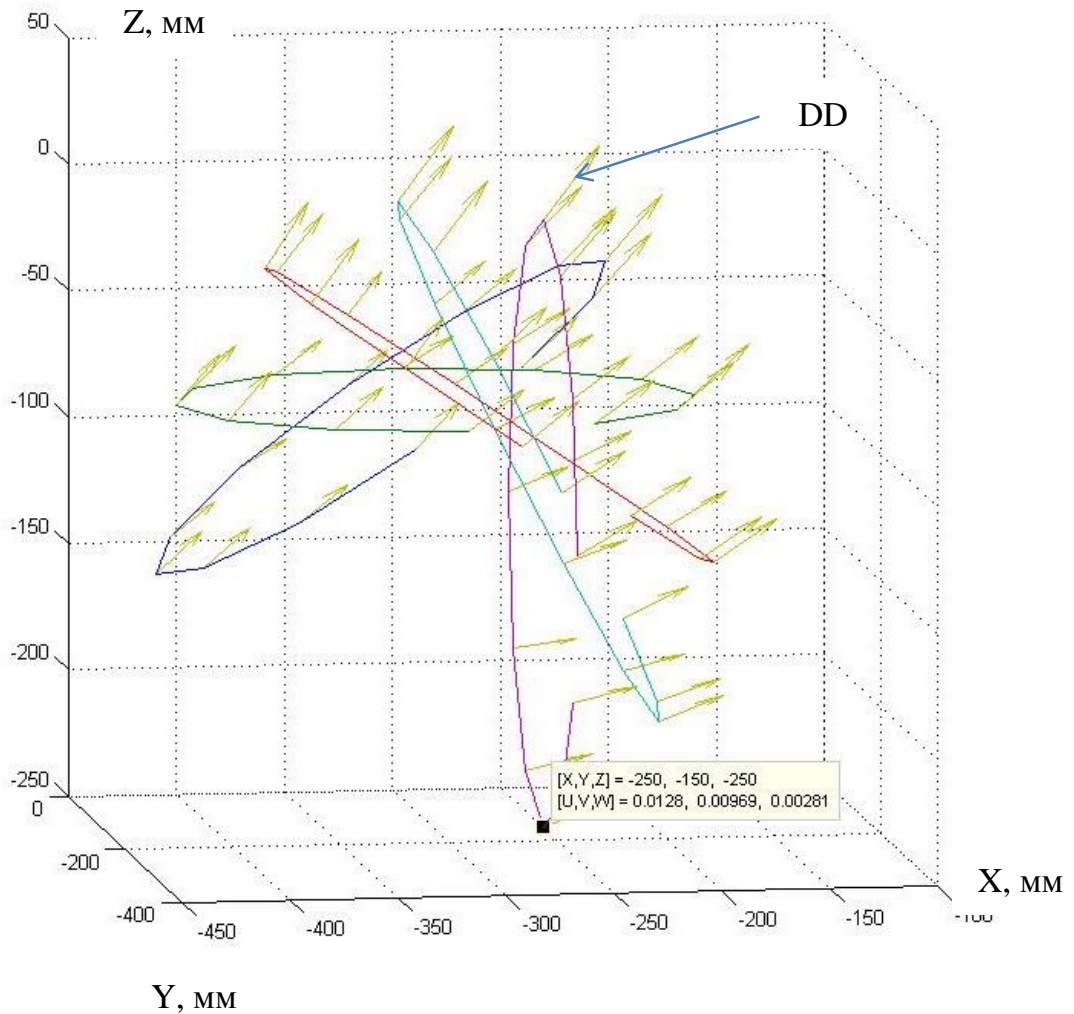


Рис. 3.27. Пример результатов расчёта интегрального отклонения DD в контрольных точках рабочего пространства

3.3.3.2. Методика проведения имитационного моделирования

Объёмная точность многокоординатной машины характеризуется множеством векторов $DD(i)$. Разработка эффективных критериев и алгоритмов их вычисления является отдельной задачей и требует дополнительных исследований. В настоящей работе для опробования методики анализа точности использовались упрощённые критерии, а именно, максимальное по модулю интегральное отклонение $M = \max \text{mod}(DD)$ во всех контрольных точках i и

разность между максимальным и минимальным значениями модуля интегрального отклонения $\Delta = \max \text{mod}(\mathbf{DD}) - \min \text{mod}(\mathbf{DD})$.

Для того чтобы можно было исследовать влияние первичных отклонений на объёмную точность (критерии M и Δ), необходимо иметь возможность оперативно изменять вводимые в модель первичные отклонения. Для этих целей в имитационной модели psd43.m (ПРИЛОЖЕНИЕ № 3) был введён 41 пропорциональный коэффициент $e(i)$ $i = 1, \dots, 41$, на который умножаются первичные отклонения. Варьируя коэффициентами $e(i)$ и вычисляя критерии M и Δ , можно исследовать характер влияния различных первичных отклонений на объёмную точность многокоординатной машины.

Можно варьировать коэффициентами $e(i)$ «вручную» и смотреть визуально за изменениями критериев M и Δ . Эта методика в имитационном моделировании получила название «See - why». Используя её, удалось убедиться, что первичные отклонения, разделяются по влиянию на интегральное отклонение на две группы:

- 1) переносимые «один к одному» со своим знаком,
- 2) переносимые мультипликативно (угловое отклонение умножается на расстояние между точкой перемещения и осью поворота).

Из этого следует важный вывод:

При одинаковых по модулю первичных отклонениях, но отличающихся по знаку \pm , мы будем иметь совершенно различные значения интегральных отклонений – критериев M и Δ . *(Это подтверждается имитационным моделированием.)*

При одних и тех же (по модулю) первичных отклонениях (Приложение № 5), но меняющемся коэффициенте $e(i) = \pm 1$ $i = 1, \dots, 41$, мы будем иметь множество реализаций, размерностью 2^{41} . Каждому из 2^{41} сочетанию коэффициентов $e(i)$ будет соответствовать своё множество интегральных отклонений $\mathbf{DD}(i)$ и свои критерии M и Δ . Просмотр всего множества $2^{41} = 219902325552$ занимает много машинного времени счета. Было приме-

нено статистическое моделирование (метод Монте-Карло). «Случайным образом выбрасывалось» сочетание $e(i) = +/-1$ $i = 1, \dots, 41$ из множества $2^{41} = 2199023255552$ и для него вычислялись критерии M и Δ (программа psd43.m). По этой программе было вычислено для 1000 сочетаний $e(i) = +/-1$ $i = 1, \dots, 41$ критерии M и Δ . Статистическая обработка этих значений показала, что

для критерия M :

$$\max M = 0,0835 \text{ мм,}$$

$$\min M = 0,00065 \text{ мм,}$$

$$\text{mean } M = 0,0450 \text{ мм,}$$

$$\text{srd } M (\sigma) = 0,0118 \text{ мм,}$$

для критерия Δ :

$$\max M = 0,0526 \text{ мм,}$$

$$\text{mean } M = 0,0240 \text{ мм,}$$

$$\text{srd } M (\sigma) = 0,0068 \text{ мм.}$$

При уменьшении первичных отклонений по модулю вдвое указанные критерии имеют следующие значения (уменьшаются примерно вдвое):

для критерия M :

$$\max M = 0,0406 \text{ мм,}$$

$$\min M = 0,00036 \text{ мм,}$$

$$\text{mean } M = 0,0227 \text{ мм,}$$

$$\text{srd } M (\sigma) = 0,0061 \text{ мм,}$$

для критерия Δ :

$$\max M = 0,0255 \text{ мм,}$$

$$\text{mean } M = 0,0108 \text{ мм,}$$

$$\text{srd } M (\sigma) = 0,0034 \text{ мм.}$$

Вывод:

Выдерживая допуск на первичные отклонения только по модулю каждого первичного отклонения, мы получаем для каждой конкретной машины своё интегральное отклонение, которое может существенно отличаться от допуска на первичные отклонения. **Так при допуске на первичные отклонения 0,005 мм интегральное отклонение может принимать значения в диапазоне $M = 0,0007 \div 0,0835$ (среднее 0,0450) мм, а $\Delta = 0,0036 \div 0,0526$ мм (среднее 0,0240 мм).**

Таким образом, наряду с допуском на первичные отклонения необходимо допуск на интегральные отклонения и создание средств измерения объёмной точности многокоординатных машин с ЧПУ на холостом ходу. Для 5 координатных станков допуск на интегральные отклонения косвенно вводится через допуск на обработку образца-изделия.

3.3.3.3. Чувствительность критерия точности к изменению первичных отклонений (матрица чувствительности)

Априори первичные отклонения в разной степени влияют на объёмную точность многокоординатной машины. Поэтому задача вычисления матрицы чувствительности для 41 первичного отклонения является очень важной задачей анализа точности. Матрица чувствительности - это баланс точности многокоординатной машины.

Эта задача решается с помощью программы psd44.m. Чувствительность объёмной точности к изменению того или иного первичного отклонения определяется стандартным способом. Дается приращение тому или иному первичному отклонению и смотрится изменение критериев M и Δ . Отношение изменения критериев к величине приращения первичного отклонения есть чувствительность объёмной точности к изменению первичного отклонения.

В ПРИЛОЖЕНИИ № 6 представлена матрица чувствительности.

Наибольшая чувствительность наблюдается в отношении первичных отклонений, имеющих мультипликативную природу. Матрица чувствительности является сугубо индивидуальной для данного экземпляра машины, т.е. для данной совокупности «приобретённых» первичных отклонений. Для другого набора первичных отклонений будет другая матрица чувствительности.

3.3.3.4. Синтез точности многокоординатной машины с ЧПУ с использованием имитационного моделирования

Проведённый анализ точности с помощью имитационной модели позволяет предложить новый способ повышения объёмной точности конкретного экземпляра машины. Способ заключается в том, что коррекцию первичных отклонений (14 из 41) проводят не по критерию минимума 14 первичных отклонений, а по критерию минимума объёмной точности, например, M и Δ . Коррекция по 14 первичным отклонениям подбираются таким образом, чтобы M и Δ были минимальными.

Для этого необходимо:

- 1) Измерить все 41 первичные отклонения и объёмную точность.
- 2) Ввести значения 41 первичного отклонения в программу имитационного моделирования.
- 3) Провести поиск оптимальных значений 14 первичных отклонений с помощью программы имитационного моделирования.
- 4) Ввести файлы коррекции в систему ЧПУ данного экземпляра машины и провести измерение объёмной точности и удостовериться о правильности проведённой коррекции.

Если ставится задача модернизации данной модели машины (станка) с целью повышения её точностных параметров, то в этом случае необходимо исследовать баланс точности данной модели машины. Построить матрицу чувствительности по критериям $\text{mean } M$ и $\text{mean } \Delta$ и выработать мероприятия повышения достижимой точности первичных отклонений, наиболее сильно влияющих на объёмную точность многокоординатной машины с ЧПУ.

Разработанная имитационная модель (psd0.m, psd43.m) являются моделями открытого типа, т.е. позволяют их развивать путём введения дополнительных вычислительных процедур и новых данных о первичных отклонениях.

Возможны следующие направления развития имитационной модели для решения задач анализа и синтеза точности многокоординатных машин с ЧПУ:

1) Введение информации о первичных отклонениях в функции направления движения (учёт отклонений «обратного хода») и вычислительных процедур учёта направления движения.

2) Введение информации о случайной составляющей первичных отклонений и соответствующих вычислительных процедур для анализа и синтеза точности многокоординатной машины в условиях статистического (вероятностного) имитационного моделирования.

3.4. Выводы по главе

1. Разработана матричная и имитационная (кинематическая) модели образования отклонений исполнительных органов многокоординатной машины с ЧПУ на примере станка мод. МС – 300. Матричная модель имеет компактную форму и удобна для построения имитационной модели. Методика построения матричной и имитационной модели может быть распространена на другие структуры механизмов с вращательными и поступательными парами (сводящимися к ним).

2. Имитационная модель имеет блочное построение с открытой структурой и может расширяться путем дальнейшего развития описания первичных отклонений, как например, введением случайной составляющей отклонений, введением зависимости отклонений позиционирования от направления и др.

3. Имитационная модель образования отклонений исполнительных органов многокоординатной машины с ЧПУ опробована на частных случаях формирования интегрального отклонения по первичным отклонениям для

структуры станка мод. МС – 300. Результаты согласуются с результатами отклонений обхода эталонной окружности с помощью прибора «ballbar» QC 10 [79].

4. Созданная имитационная модель удобна для решения задач анализа и синтеза точности многокоординатных машин с ЧПУ с механизмами последовательной структуры и поступательными и вращательными парами. Модель легко трансформируется путём изменения исходных данных.

5. Проведенные машинные эксперименты с помощью имитационной модели показали, что выдерживая допуск на первичные отклонения только по модулю каждого первичного отклонения, мы получаем для каждой конкретной машины своё интегральное отклонение, которое может существенно отличаться от допуска на первичные отклонения. На этот факт указывают производители 5 координатных станков с ЧПУ.

6. Наряду с допуском на первичные отклонения необходим допуск на интегральные отклонения и создание средств измерения объёмной точности многокоординатных машин с ЧПУ на холостом ходу.

ГЛАВА IV. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРВИЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ

4.1. Введение

Измерение первичных отклонений в механизмах НС машины является важным этапом калибровки машины. В процессе измерения получается информация, необходимая для составления файла коррекции, вводимого в систему ЧПУ машины. Кроме того, данные о первичных отклонениях звеньев механизмов несущей системы станка необходимы для выявления методами имитационного моделирования возможностей повышения точности многокоординатной машины. Значения первичных отклонений являются исходными данными для проведения имитационного моделирования с помощью моделей, описанных в главе III. Ниже последовательно рассмотрены основные методы и средства измерений всего спектра первичных отклонений механизмов многокоординатной машины на примере станка мод. МС – 300. Особое внимание уделяется современным средствам измерения [105-106], которые позволяют получать информацию в цифровом виде, удобном для составления файлов коррекции, вводимых в систему ЧПУ.

Ниже, рассмотрены основные устоявшиеся понятия метрологии, которые необходимы для систематизации дальнейшего рассмотрения методов и средств измерения первичных отклонений.

4.2. Основные понятия метрологии, необходимые для рассмотрения методов и средств измерения первичных отклонений звеньев механизмов

Измерение – совокупность преимущественно экспериментальных операций, выполняемых с помощью технического средства, хранящего единицу величины, позволяющего сопоставить измеряемую величину с её *единицей* и получить искомое значение величины. Это значение называют результатом измерений [51].

Единица измерения физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин. В случае линейных измерений – метр (м), угловых – радиан (угол сектора, в котором дуга равна радиусу (мкм/м, угловая секунда)).

Измерения разделяются на виды по способу получения информации (рис. 4.1), среди которых можно выделить два основных измерения [77]:

Прямое измерение (прямой метод измерения) - измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно (сравнением величины с её единицей).

Косвенное измерение (косвенный метод измерения) - измерение, при котором определение искомого значения физической величины получают на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

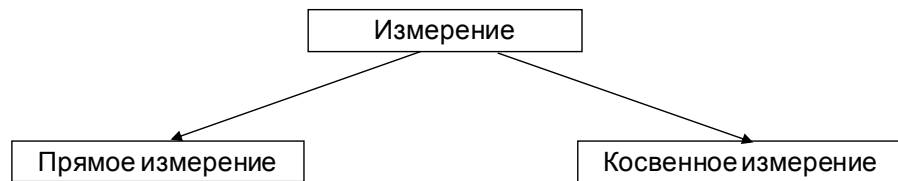


Рис. 4.1. Разбивка измерений по способу получения информации

При калибровке и аттестации металлорежущих станков измерения первичных отклонений осуществляются, как правило, прямыми измерениями.

Измерения могут осуществляться различными методами.

Метод измерений – прием или совокупность приёмов сравнения измеряемой физической величины с её единицей в соответствии с реализованным принципом измерения.

На рис. 4. 2 представлены основные методы измерений в соответствии с [51,56,63,77].

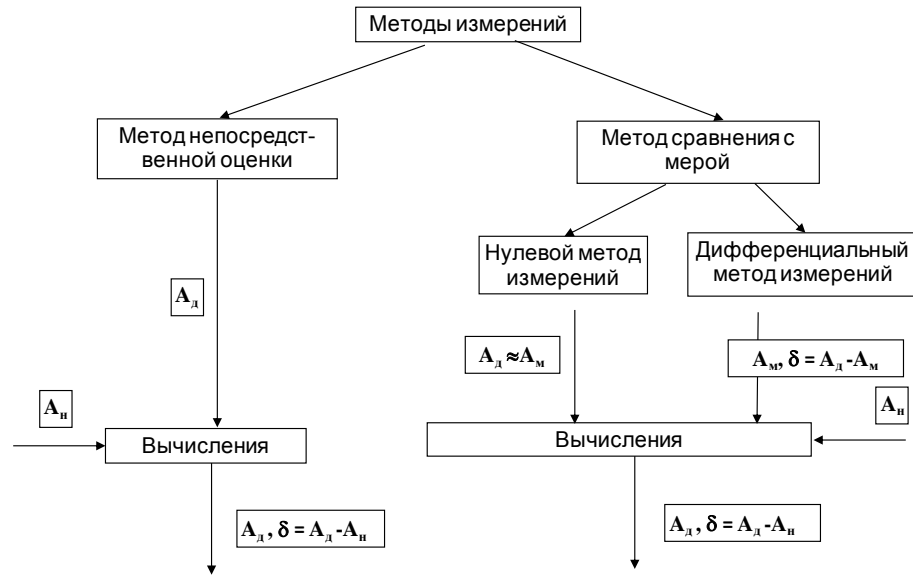


Рис. 4. 2. Основные методы измерений

Здесь: A_d – действительная величина (действительный размер), A_m – величина меры (размер меры), A_n – номинальная (заданная) величина (размер), δ - отклонение действительной величины A_d от номинальной A_n .

Метод непосредственной оценки – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений (микрометр, штангенциркуль, интерферометр).

Суть метода непосредственной оценки, как любого метода измерения состоит в сравнении измеряемой величины с мерой, принятой за единицу, но в этом случае мера "заложена" в измерительный прибор опосредованно, через шкалу или длину волны как в интерферометре.

Метод сравнения с мерой – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой, типичный пример - весы.

Различия между двумя методами измерений заключаются в том, что метод непосредственной оценки реализуют с помощью приборов без дополнительного применения мер, а метод сравнения с мерой предусматривает

обязательное использование овеществленной меры, выделенной отдельно от прибора.

Метод сравнения с мерой реализуется в нескольких разновидностях, среди которых различают:

- дифференциальный и нулевой методы измерений,
- метод совпадений,
- метод измерений замещением и метод противопоставления,
- метод измерений дополнением.

Следует отметить, что при линейных и угловых измерениях в машиностроении в основном применяются дифференциальный и нулевой методы измерений.

Дифференциальный метод измерений – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами.

Нулевой метод измерений – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля (Хотя нулевой метод является частным случаем дифференциального метода, он выделен в отдельный метод в виду его широкого применения на практике).

Измерения отличаются не только методами, но и по принципу измерений.

Принцип измерений – физическое явление или эффект, положенный в основу измерений.

В качестве принципов измерений применяется большое количество эффектов. Для измерения первичных отклонений звеньев, входящих в поступательные и вращательные пары, преимущественно используют следующие принципы:

- принцип рычага - передаточного числа механической передачи (измерительные головки),

- индукция (индуктивные датчики),
- заряд конденсатора (емкостные датчики),
- явление интерференции волн (интерферометры),
- явление гравитации (уровнемеры),
- распространение луча света (оптические приборы),
- фотоэлектрический, термоэлектрический, пьезоэлектрический и др. эффекты.

Ниже, последовательно, рассмотрены различные методы и средства измерения первичных отклонений для 5 координатного станка мод. МС - 300. Основное внимание уделяется современным средствам измерения.

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Ниже, если специально не оговаривается, измерения проводятся в соответствии с ГОСТ 22267-76 «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров».

4.3. Измерение первичных отклонений

Набор первичных отклонений для звеньев, входящих в поступательные и вращательные пары механизмов несущей системы станка мод. МС - 300, состоит из 41 отклонения:

- $E_{XX}, E_{YY}, E_{ZZ}, E_{BB}, E_{CC}$ - отклонения позиционирования по линейным и угловым координатам,
- $E_{YX}, E_{ZX}, E_{XY}, E_{ZY}, E_{XZ}, E_{YZ}$ - отклонения от прямолинейности движения,
- $E_{AX}, E_{BX}, E_{CX}, E_{AY}, E_{BY}, E_{CY}, E_{AZ}, E_{BZ}, E_{CZ}$ — отклонения осей поворота узлов станка линейных координат,

- EAB, ECB, EBC, EAC — отклонения от вертикали и горизонтали осей поворота поворотных столов В и С,
- EXB, EZB, EXC, EYC — радиальные биения поворотных столов,
- EYB, EZC — аксиальные биения поворотных столов,
- $\theta_{xy}, \theta_{xz}, \theta_{yz}, \theta_{bc(AOC)}, \theta_{bc(BOC)}, \theta_{bxz}, \theta_{byz}$ - отклонений от перпендикулярности движений,
- $\Delta_{bcx}, \Delta_{bcz}$ — отклонения от пересечения осей В и С,
- $\Delta_{xcb}, \Delta_{zcb}$ - отклонения точки пересечения осей С и В в пл. XZ от номинального положения.

Следует отметить, что применительно к другим 5 координатным станкам (пять подвижных узлов) последовательной структуры количество указанных параметров естественно останется прежним — 41, но обозначения указанных параметров будут другими.

4.3.1. Измерение отклонений позиционирования вдоль линейных и угловых координат

Отклонение позиционирования – это отклонение от заданного положения есть разность между действительным и заданным положением рабочего органа станка. (ГОСТ 27843-2006 «Станки металлорежущие. Методы проверки точности позиционирования»).

4.3.1.1. Измерение отклонений позиционирования вдоль линейной координаты (EXX, EYY, EZZ)

Методика измерения отклонений выхода в точку позиционирования регламентирована ГОСТ 27843-2006 «Станки металлорежущие. Методы проверки точности позиционирования» и ISO-230-2 1997.

При измерении отклонений позиционирования вдоль линейной координаты (EXX, EYY, EZZ) используются измерительные средства *метода непосредственной оценки*:

- лазерный интерферометр, оснащенный линейной оптикой (допустимая погрешность измерения с использованием лазерного интер-

ферометра мод. ML 10 ф. Renishaw [78] составляет с блоком компенсации EC10 +/- 0,7мкм (4 σ),

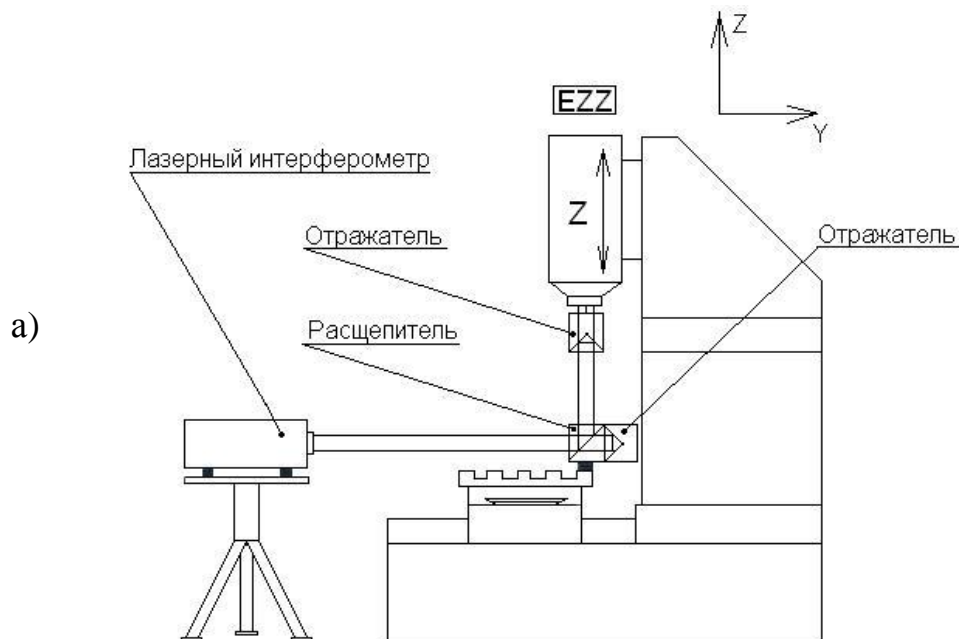
- штриховая линейка (допустимая погрешность измерений с использованием штриховой линейки мод. VM 182 ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH составляет ± 1 мкм [173]).

Также для измерения отклонений позиционирования вдоль линейной координаты находят широкое применение измерительные средства *метода сравнения с мерой*. Наиболее часто используется:

- калибровочная линейка с шарами (допустимая погрешность измерений с использованием калибровочной линейки с шарами мод. MТВ-500SC ф. IBS Precision Engineering [171] составляет $u = 0.8$ мкм + $L/1000$, где L — измеряемая длина в мм ($k=2, 2\sigma$)).

В работе [198] описана процедура измерения отклонений от заданной позиции на координатной измерительной машине мод. XYZAXGS600C с использованием калибровочной линейки. Полученные результаты сравниваются с данными, полученными с помощью лазерного интерферометра. Результаты хорошо совпадают.

На рис. 4. 3 приведены указанные выше средства измерения.



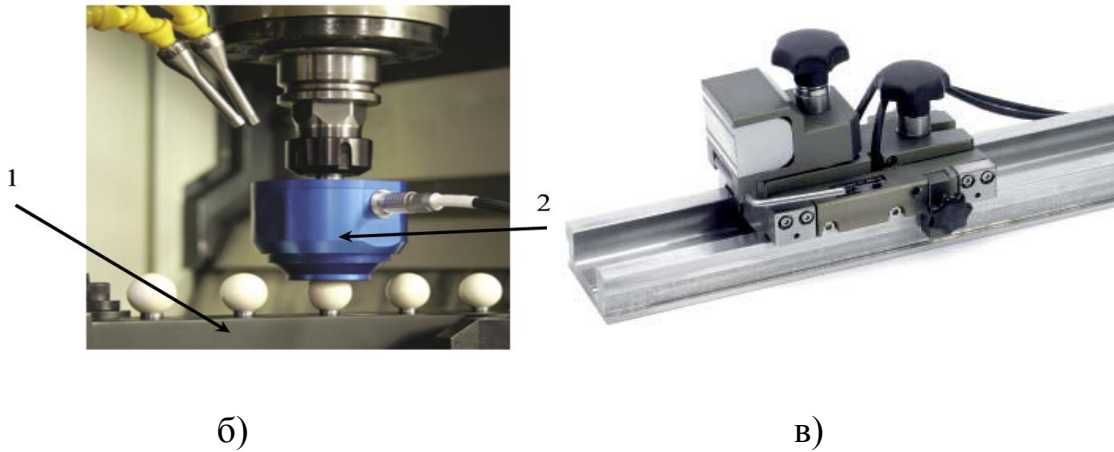


Рис. 4.3. Современные приборы для измерения отклонений позиционирования: а) лазерный интерферометр ML 10 ф. Renishaw, б) калибровочная линейка с шарами мод. MTB-500SC ф. IBS Precision Engineering (1- калибровочная линейка, 2 - ёмкостной преобразователь, установленный в шпинделе станка), в) штриховая линейка мод. VM 182 ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH

4.3.1.2 Измерение отклонений позиционирования по угловой координате (ЕВВ, ЕСС)

При измерении точности позиционирования по угловой координате используются измерительные средства *метода непосредственной оценки*:

- лазерные интерферометры с угловой оптикой и устройством RX 10 ф. Renishaw (допустимая погрешность измерения угла поворота составляет $\pm 1''$ (4σ) индексация - 5°)

- автоколлиматор с шестигранной призмой (общая погрешность измерения угла, например, для автоколлиматора цифрового двух координатного ОПТРО-АК-012 ф. ООО "Оптротех" [66] составляет в диапазоне измерений угла $\pm 5'$ по горизонтальной оси и $\pm 5'$ по вертикальной оси - не более $\pm 0.5''$, автоматизирована процедура записи (съёма) результатов измеренных отклонений). В погрешность измерения угловых отклонений при позиционировании поворотного стола входят также погрешности используемой оптической шестигранной призмы.

На рис. 4.4, а) представлена схема измерений углового положения поворотного стола с помощью лазерного интерферометра ML10, оснащён-

ного угловой оптикой и устройством RX 10, а на рис. 4.4 б) - общий вид устройства RX 10, установленного для измерений угла поворота вокруг горизонтальной оси (ось В для станка мод. МС – 300).

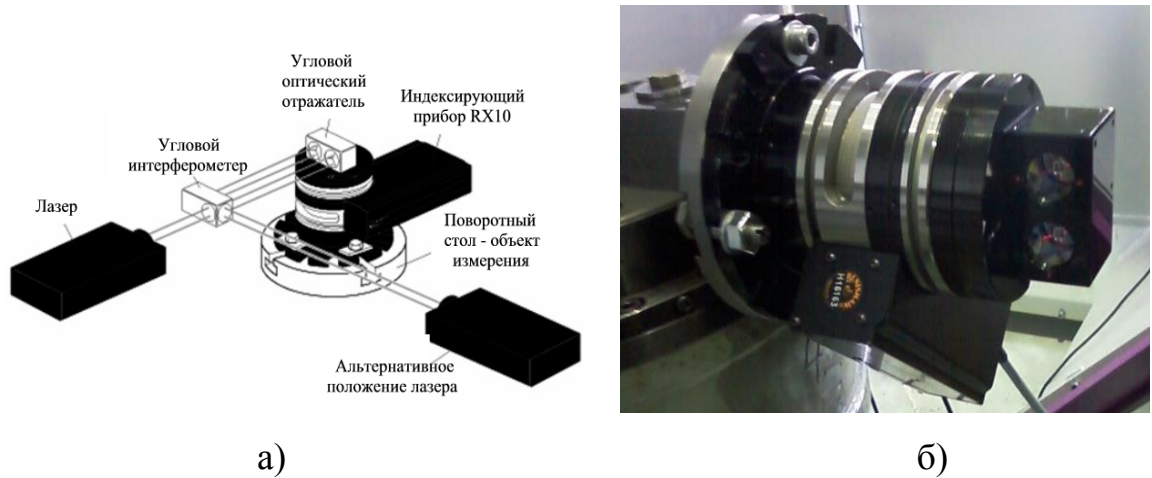


Рис. 4.4. Индексирующий прибор RX10 и его применение для измерения углового отклонения вокруг горизонтальной оси корпуса планшайбы станка мод. МС - 300

При использовании лазерного интерферометра с угловой оптикой и индексирующего устройства мод. RX 10 для измерения отклонений позиционирования поворотных столов и поворотных головок существенно уменьшается трудоёмкость процесса измерения (измерения проводятся в автоматическом режиме).

4.3.2. Измерение отклонений от прямолинейности (EYX, EZX, EXY, EZY, EXZ, EYZ)

Отклонение от прямолинейности перемещения (ГОСТ 22267-76 «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров») проверяемого рабочего органа в заданной плоскости – наибольшая алгебраическая разность ординат траектории функциональной точки проверяемого рабочего органа или ординат траектории относительного движения функциональной точки неподвижной части станка по отношению к проверяемому рабочему органу, в прямоугольной системе координат, ось абсцисс которой проходит через начало и конец траектории. Функциональная

точка – точка, которая определяет формообразование обрабатываемого изделия.

Для измерения отклонений от прямолинейности применяются следующие измерительные средства *метода непосредственной оценки*:

- лазерные интерферометры с оптикой для измерения отклонений от прямолинейности (допустимая погрешность измерения при применении ML 10 составляет +/- 0,5 мкм, 4σ),
- штриховые линейки (допустимая погрешность измерений при применении мод. VM 182 ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH составляет +/- 1,5 мкм на длине 420 — 1520 мм),
- труба визирная измерительная (допустимая погрешность измерения при применении визирно-автоколлимационного прибора ОПТРО-ППС-031 ф. ООО "Оптротех" составляет $\pm (5+2* L)$ мкм, где L - расстояние от торца визирной трубы до марки в м),
- электронные уровнемеры и автоколлиматоры.

Для измерения отклонений от прямолинейности движения узла станка также используются измерительные средства с реализацией *метода сравнения с мерой*:

- поверочные твердокаменные линейки (допуск плоскостности линейки класса точности 00 с широкой рабочей поверхностью ТУ 2-034-816-81 из твердокаменных пород (ОАО «Ставропольский инструментальный завод» [54]) составляет 2 мкм),
- струна и микроскоп (погрешность измерения отклонений от прямолинейности составляет ≈ 30 мкм для длины 10 м и ≈ 130 мкм для длины 30 м [121, с. 284]).

Следует отметить, что для измерения отклонений от прямолинейности движения подвижных узлов станка перспективными являются лазерный интерферометр и штриховая линейка. На рис. 4.5, а) представлен набор оптики для лазерного интерферометра ML 10 ф. Renishaw и показан ход лучей для

случая установки расщепителя луча в шпинделе станка, а на рис. 4.5, б) штриховая линейка мод. VM 182 ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH.

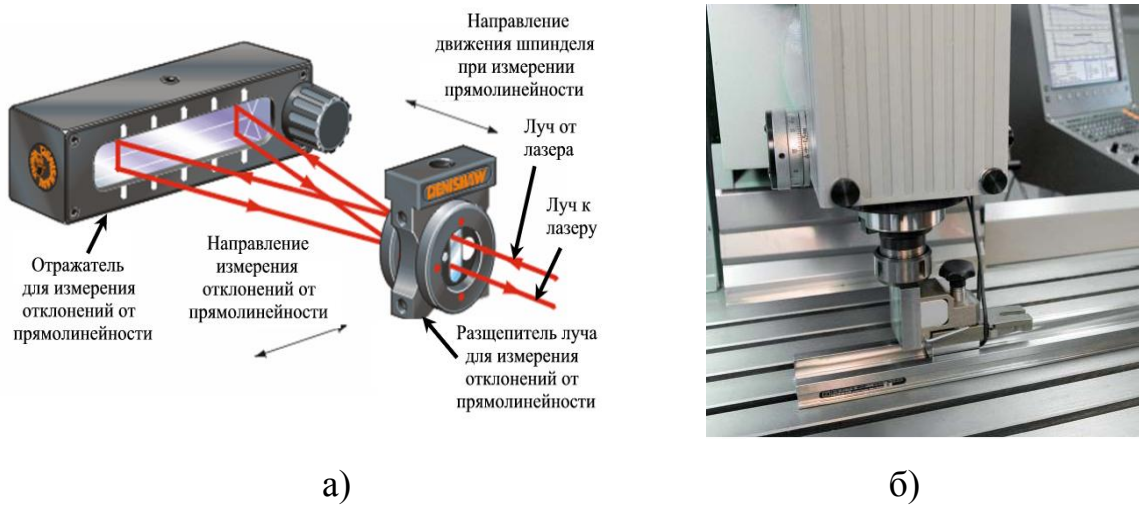


Рис. 4.5. Перспективные средства измерения отклонений от прямолинейности:

а) набор оптики и принцип направления лучей лазера при измерении отклонений от прямолинейности движений исполнительных органов станка, б) штриховая линейка мод. VM 182 ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, установленная на столе испытываемого станка

4.3.3. Измерение угловых отклонений подвижного узла при линейных и угловых перемещениях (EAX, EBX, ECX, EAY, EBY, EBY, EAZ, EBZ, ECZ, EAB, ECB, EAC, EBC)

Для измерения угловых отклонений подвижного узла при линейном перемещении применяются следующие измерительные средства *метода непосредственной оценки* (рис. 4.6):

- лазерный интерферометр с угловой оптикой (допустимая погрешность измерения угла при использовании прибора мод. ML 10 составляет: $\pm 0,6\%A \pm 0,5 \pm 0,1M$ мкм/м, где A - измеряемый угол (мкм/м), M – расстояние от расщепителя луча до оптического отражателя в м),
- электронный уровень (допустимая погрешность измерения угла при использовании прибора мод. EMP-832P-50-W2 (Mahr Federal Inc., USA) со-

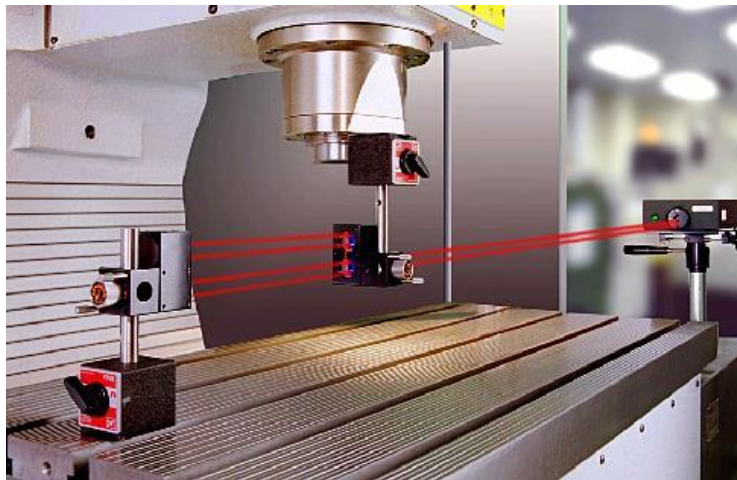
ставляет: $0,5\%A$, (где A – измеряемый угол в угл.сек), но не хуже $\pm 0,5$ угл.сек [144]).

Применение электронного уровня очень удобно в виду просты его настройки в процессе измерений. Однако он обладает двумя существенными недостатками:

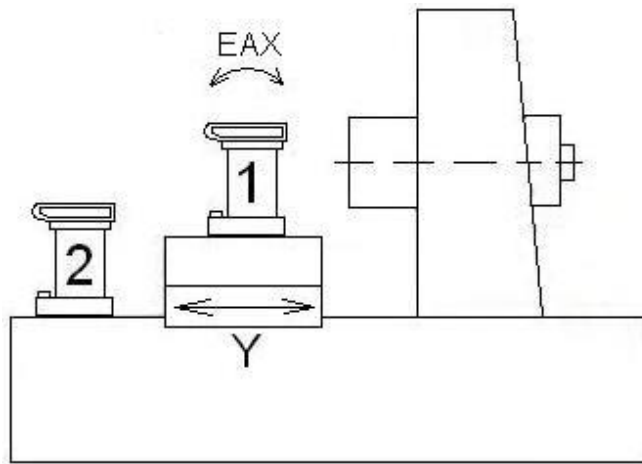
- результаты можно снимать только в «покое»,
- нельзя измерять повороты в плоскости, перпендикулярной вертикали.

Применение лазерного интерферометра дает то преимущество, что можно проводить измерения угловых отклонений при движении измеряемого объекта. Лазерные интерферометры типа ML 10 позволяют измерять угловые отклонения вокруг только двух осей, расположенных в плоскости перпендикулярной лучу лазера. Таким образом, применяя лазерный интерферометр мод. ML 10 и электронный уровень мод. EMP-832P-50-W2 можно измерять все угловые отклонения при линейных перемещениях за исключением ECZ.

Для измерения отклонений ECZ - угла поворота вокруг оси Z в функции движения по оси Z , применяется метод сравнения с мерой [199], а именно, контрольная плита с двумя индуктивными головками (преобразователями).



a)



б)



в)

Рис. 4.6. Приборы для измерения угловых отклонений при линейных перемещениях испытываемого узла станка: а) угловая оптика лазерного интерферометра, б) схема измерения углового отклонения EAX уровнем 1 и 2, в) общий вид уровня мод. EMP-832P-50-W2

В настоящее время не известны примеры проведения прямых измерений отклонений EAB , ECB , EAC , EBC на многокоординатных станках с ЧПУ.

4.3.4. Измерение осевого и радиального биения поворотных столов (EXB , EYB , EZB , EXC , EYC , EZC)

Измерение радиального биения оси вращения в соответствии с ГОСТ 22267-76 осуществляется по методу прямого измерения отклонений образцовой детали (кольца или шара). Образцовую деталь устанавливают на плоскость, перпендикулярную оси вращения (в случае планшайбы, на её зеркало). Далее, методом «выстукивания» при вращении планшайбы выставляют эталонную деталь с минимальным биением (алгебраической разностью между максимальным и минимальным линейным отклонением эталонной поверхности в плоскости, перпендикулярной оси вращения). Величина минимального биения является оценкой радиального биения поворотного стола.

Осевое биение рабочего органа станка (ГОСТ 22267-76) – разность между наибольшим и наименьшим расстоянием от данной точки оси вращения рабочего органа до плоскости, перпендикулярной к этой оси.

Измерение осевого и радиального биения поворотных столов, как правило, осуществляют с помощью измерительных головок, работающих на самых разнообразных принципах по методу непосредственной оценки. Одна из таких головок (система измерительная портативная с индуктивным преобразователем БВ-6436 [115]) показана на рис. 4.7. Прибор имеет основную погрешность измерения отклонения L , мкм не более $1 + L/333$, мкм при дискретности отсчета - 1 мкм, $0,1 + L/333$, мкм при дискретности отсчета - 0,1 мкм и $0,01 + L/333$, мкм при дискретности отсчета - 0,01 мкм. Для измерения осевого биения используются плоские измерительные наконечники и эталонный шарик небольшого диаметра $\varnothing \leq 5$ мм, устанавливаемый на проверяемой узле, например, в центре планшайбы.

Для измерения осевого биения используются индуктивный преобразователь с плоским измерительным наконечником и эталонный шарик небольшого диаметра $\varnothing \leq 5$ мм, устанавливаемый в центровое отверстие на проверяемой узле, например, планшайбе.

Для измерения радиального биения поворотного стола (планшайбы) удобно пользоваться эталонным шаром $\approx \varnothing 60$ мм (с допустимой погрешностью формы ≤ 2 мкм) и индуктивным преобразователем.



Рис. 4.7. Система измерительная портативная с индуктивным преобразователем БВ-6436

4.3.5. Измерение отклонений от перпендикулярности движений подвижного узла, участвующего в двух взаимно перпендикулярных перемещениях (θ_{xy} , θ_{xz} , θ_{yz})

В ГОСТ 22267-76 приводятся два определения отклонения от перпендикулярности:

- отклонение от перпендикулярности направлений прямолинейных перемещений равно алгебраической разности показаний показывающего прибора в крайних положениях проверяемого узла на заданной длине;
- отклонение от перпендикулярности траектории и направления прямолинейных перемещений равно наибольшей алгебраической разности показаний показывающего прибора на всей длине перемещений.

В последнем случае результаты измерения включают отклонение от прямолинейности траектории перемещения узла относительно поверочного угольника.

Для измерения отклонений от перпендикулярности движений подвижного узла (θ_{xy} , θ_{xz} , θ_{yz}) применяется при реализации метода непосредственной оценки лазерный интерферометр (рис. 4.8), оснащенный



Рис.4.8. Измерение отклонений от перпендикулярности движений исполнительных органов станка: а) набор оптики и принцип направления лучей лазера, б) измерение отклонений от перпендикулярности в пл. XZ на станке с вертикальным шпинделем

оптическим квадрантом с угловой оптикой (точность измерения отклонения от перпендикулярности при использовании прибора мод. ML 10 [78] составляет: $(\pm 0.005A \pm 2.5 \pm 0.8 M)$ [μ rad (0,2 угл. сек)], где A — отклонение на дисплее (μ rad), M – расстояние от расщепителя луча до оптического отражателя в м).

Альтернативным средством измерения отклонений от перпендикулярности при реализации метода измерения сравнения с мерой является обычный поверочный угольник из твердокаменных пород (допуск на отклонение от перпендикулярности для угольника поверочного ТУ 2-034-220832-018-90 с размерами 400x250x60 мм класса точности 00 составляет $\pm 1,6$ мкм (ОАО «Ставропольский инструментальный завод»). При проведении измерений используются в качестве прибора сравнения, например, индуктивный преобразователь с показывающим прибором "Микрон-02", индуктивный преобразователь БВ-6436 и др.

Для измерения отклонений от перпендикулярности при больших диапазонах перемещений исполнительных органов станка ($>1,5$ м) для измерения перпендикулярности движений в особо точных станках и станках с большими рабочими перемещениями может применяться косвенный метод измерений, основанный на использовании лазерного интерферометра для измерения катетов и диагонали в прямоугольнике, например, как в работе [191, 199].

4.3.6. Измерение отклонений пересечения осей В и С (Δ_{bcz} , Δ_{bcx})

Для эффективной 5 координатной обработки сложных поверхностей требуется, чтобы пять осей станка пересекались в одной точке. Этот принцип получил название Tool Pivot Point (ТПР) [163]. Применительно к станку мод. МС – 300 это означает, что оси В и С должны пересекаться. Кроме того, ось В должна лежать в плоскости «зеркала» планшайбы, чтобы удобно было её «материализовывать» при настройке станка на 5 координатную обработку.

В соответствии с ГОСТ 22267-76 измерение отклонений пересечения осей осуществляется через «материализацию» осей поворота цилиндриче-

скими оправками. Процедура «материализации» выполняется путем выставления цилиндрических оправок («выстукивания») при вращении поворотных столов, что является трудоёмкой процедурой. Отклонение от пересечения выставленных оправок измеряется стандартным измерительным приёмом с двумя измерительными головками.

Для измерения отклонений пересечения осей В и С (Δ_{bcz} , Δ_{bcx}) стандартных средств измерения в настоящее время нет. В ИМАШ РАН совместно с ОАО НИАТ было разработано измерительное устройство с образцовым шаром [111] для станка мод. МС - 300. В главе III, было показано, что для увязки систем координат корпуса планшайбы ($X_4Y_4Z_4$) и планшайбы ($X_5Y_5Z_5$) наряду с отклонением θ_{bc} от перпендикулярности между осями С и В необходимо знать отклонение (Δ_{bcz} , Δ_{bcx}) пересечения осей С и В. Отклонение пересечения осей С и В есть наименьшее расстояние между осями С и В (общий перпендикуляр к осям С и В) [67,68]. Прямое измерение наименьшего расстояния между осями С и В представляет сложную метрологическую задачу. Однако, принимая во внимание, что отклонения от перпендикулярности θ_{bc} , θ_{bxz} и θ_{byz} осей С и В практически не превышают $30''$, величину отклонения от пересечения осей С и В с достаточной точностью можно оценить проекцией Δ_{bcx} на ось X. Уменьшая величину Δ_{bcx} , мы стремимся к пересечению осей С и В.

Требование, чтобы ось В лежала в плоскости «зеркала» планшайбы, регламентируется отклонением Δ_{bcz} – проекцией расстояния осей С и В от «зеркала» планшайбы на ось Z.

Для измерения отклонений Δ_{bcx} и Δ_{bcz} удобно пользоваться измерительным приспособлением, принцип действия которого основан на замечательном свойстве шара – равноудалённости каждой точки его поверхности от центра.

На рис. 4.9 представлена схема измерения отклонений Δ_{bcx} и Δ_{bcz} с помощью эталонного шара и концевой меры, равной радиусу эталонного

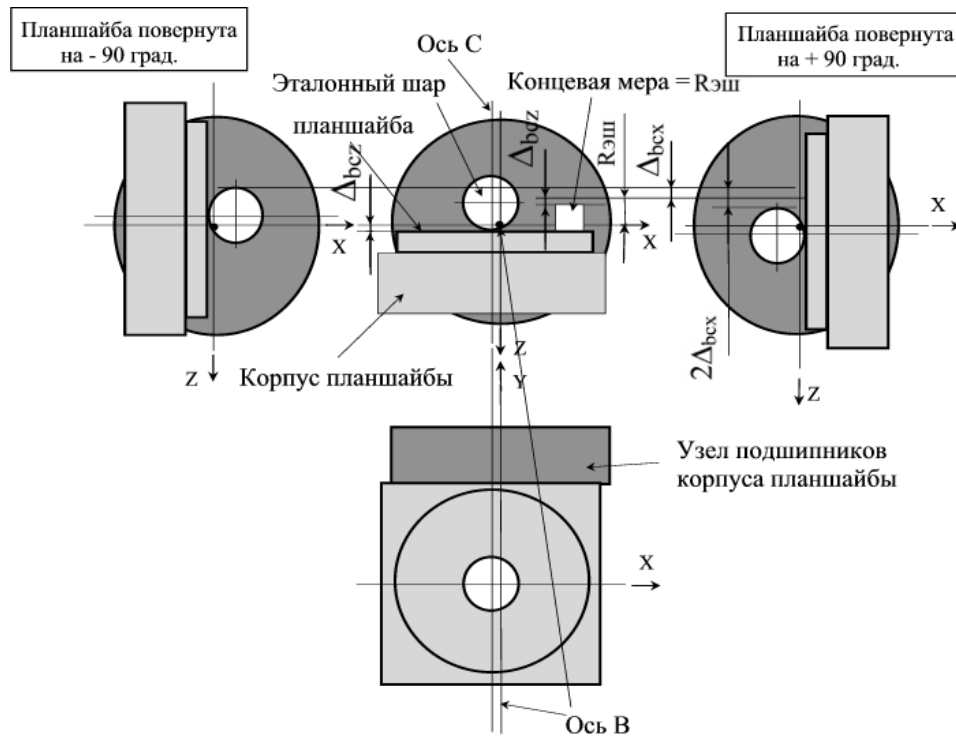


Рис. 4.9. Схема измерений отклонений Δ_{bcx} и Δ_{bcz}

шара $R_{Эш}$. Эталонный шар и концевая мера устанавливаются на «зеркале» планшайбы.

На рис. 4.10 показан общий вид приспособления, с помощью которого реализуется приведенная на рис. 4.9 схема измерений отклонений Δ_{bcx} и Δ_{bcz} . Приспособление установлено на «зеркале» планшайбы при горизонтальном её положении.

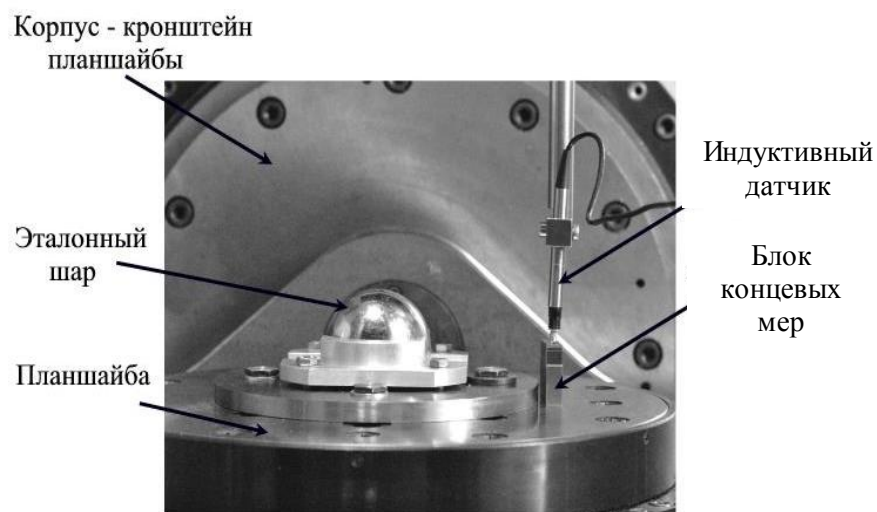


Рис. 4.10. Общий вид приспособления для измерения Δ_{bcx} и Δ_{bcz} при горизонтальном положении планшайбы

4.3.7. Измерение отклонений от перпендикулярности осей В и С (θ_{bc}) и отклонений от перпендикулярности оси В к пл. $X_0 Z_0$ (θ_{bxz} , θ_{bxy})

В настоящее время универсальных средств измерения отклонений θ_{bc} , θ_{bxz} , θ_{bxy} нет. На практике для контроля этих отклонений используются измерения интегральных отклонений, в которые они входят:

$\Delta_{сзп0^\circ}$ – измерение отклонений от параллельности движения стойки относительно «зеркала» планшайбы в её горизонтальном положении,

$\Delta_{сзп+90^\circ}$ - измерение отклонений от параллельности движения стойки относительно «зеркала» планшайбы в вертикальном положении $+ 90^\circ$,

$\Delta_{сзп-90^\circ}$ - измерение отклонений от параллельности движения стойки относительно «зеркала» планшайбы в вертикальном положении $- 90^\circ$.

$$\Delta_{сзп0^\circ}(y) = \Delta_{\theta_{bc}}(y) + \Delta_{\theta_{byz}}(y) + \Delta_{плп}(y) + \Delta_{тб}(y) + \Delta_{пар}(y),$$

$$\Delta_{сзп+90^\circ}(y) = +\Delta_{\theta_{bc}}(y) + \Delta_{плп}(y) + \Delta_{тб}(y) + \Delta_{\theta_{bxy}}(y),$$

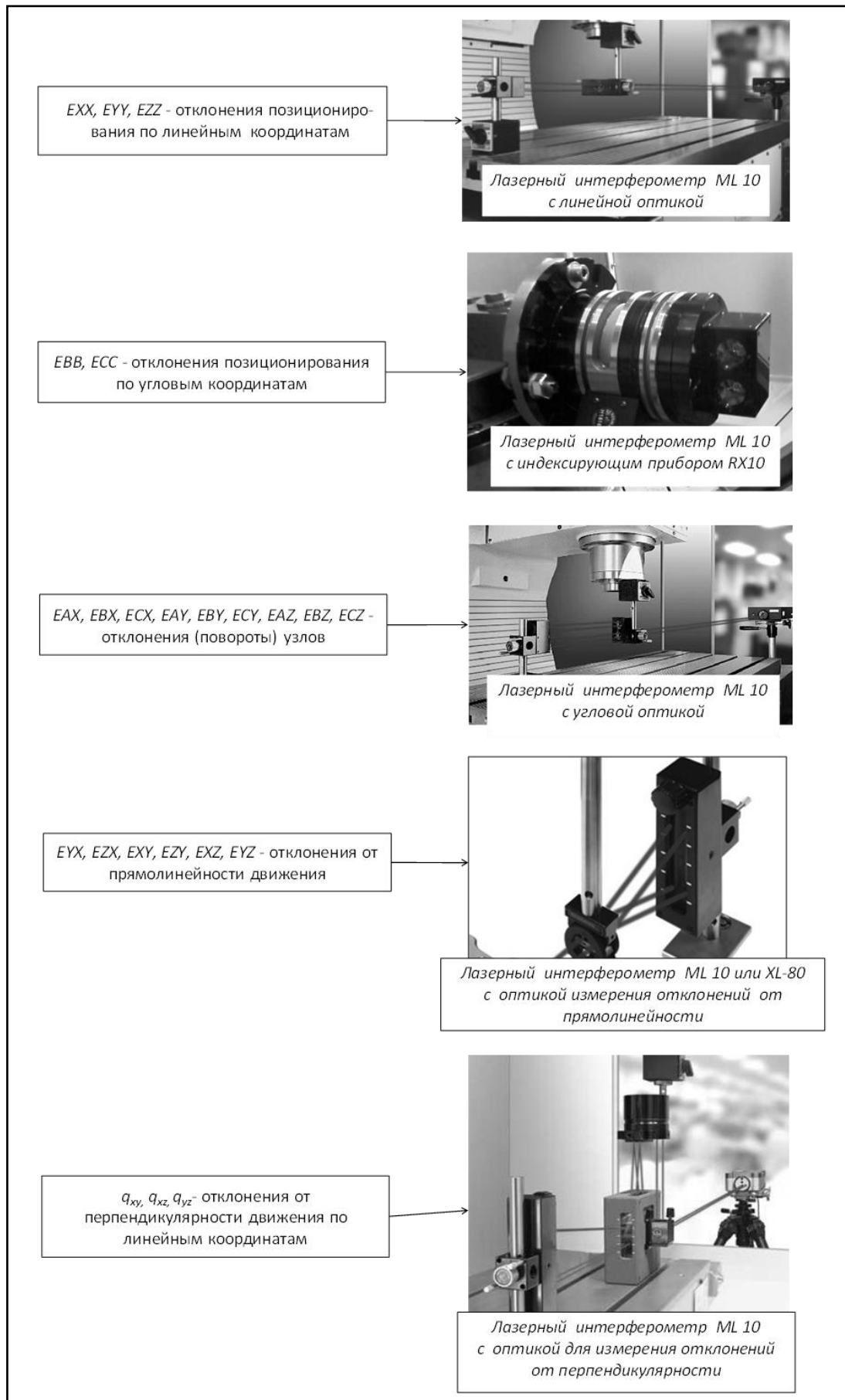
$$\Delta_{сзп-90^\circ}(y) = +\Delta_{\theta_{bc}}(y) - \Delta_{плп}(y) - \Delta_{тб}(y) - \Delta_{\theta_{bxy}}(y),$$

где $\Delta_{плп}(y)$ - отклонение от плоскостности планшайбы в функции перемещения стойки, $\Delta_{тб}(y)$ - торцевое биение планшайбы, $\Delta_{пар}(y)$ - отклонение от параллельности движения стойки относительно пл. $X_0 Y_0$.

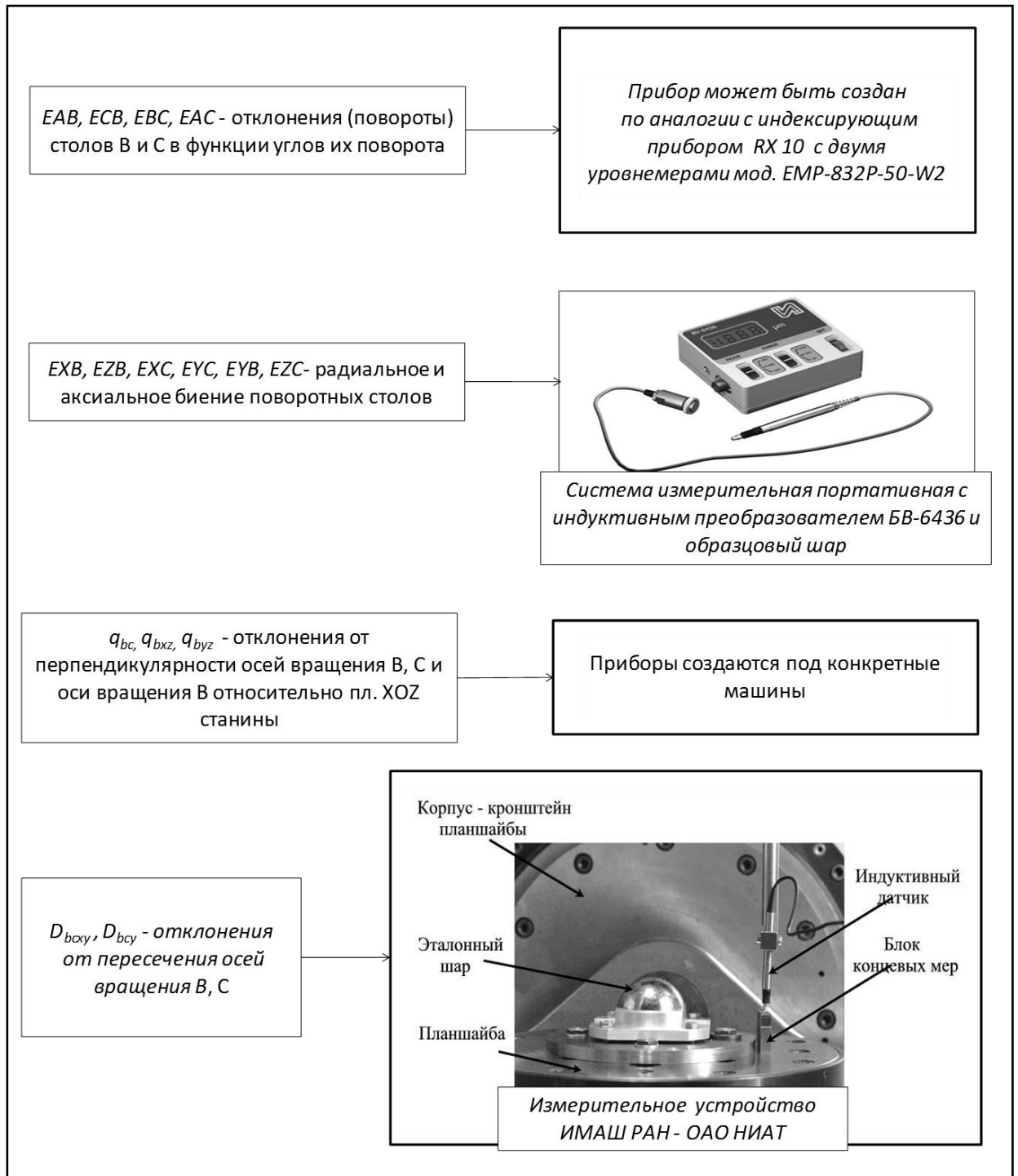
В настоящее время считается, если отклонения $\Delta_{сзп0^\circ}(y)$, $\Delta_{сзп+90^\circ}(y)$, $\Delta_{сзп-90^\circ}(y)$ входят в допуск, то и отклонения θ_{bc} , θ_{bxz} , θ_{bxy} также не превышают допустимых значений.

На рис. 4.11 сведены воедино рассмотренные средства измерения первичных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ.

Анализ средств измерения первичных отклонений показывает, что наблюдается отставание в создании средств измерений первичных отклонений звеньев с вращательными парами (поворотные столы и головки).



a)



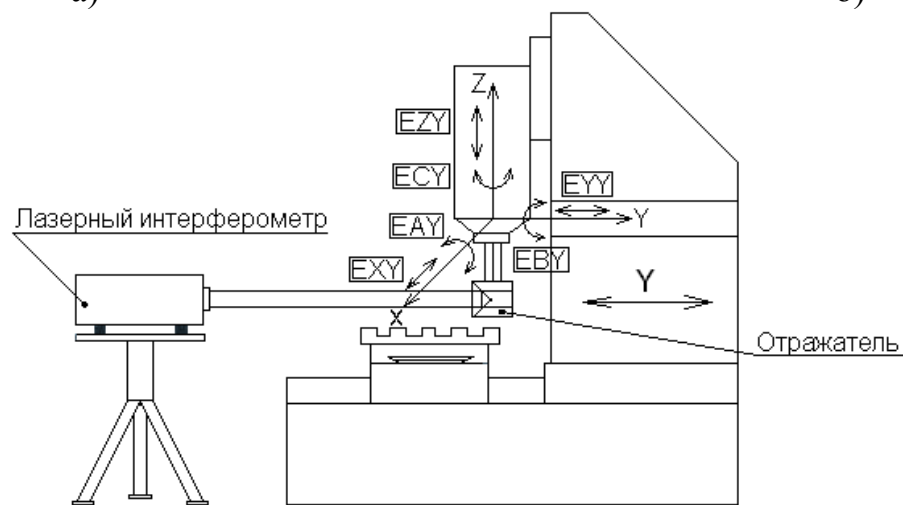
б)

Рис. 4.11. Средства измерения первичных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ: а) для линейных координат, б) для угловых координат



а)

б)



в)

Рис. 4.12. Лазерный интерферометр мод. XD Laser ф. Automated Precision Inc.: а) общий вид интерферометра, б) индикация измеряемых отклонений в процессе измерения, в) схема измерений

Одновременно в настоящее время появились и начинают широко применяться измерительные средства, позволяющие одновременно измерять сразу несколько первичных отклонений.

1) Лазерный интерферометр ф. Automated Precision Inc. [196].

Этот лазерный интерферометр позволяет за один прогон движущегося узла сразу измерить 6 его отклонений (6 D) (прямые измерения сразу по 3 позициям: 1, 3, 4 на рис. 4.11 с аналогичными точностными характеристиками). Это существенно упрощает процедуру измерений, снижает трудоёмкость и

время проведения измерительной операции. На рис. 4.12, а) представлен общий вид лазерного интерферометра мод. XD Laser и оптического отражателя.

На рис. 4.12, б) представлена индикация измеряемых отклонений, а на рис. 4.12, в) схема измерений 6 отклонений шпиндельной бабки при движении по координате Y (EXY, EYY, EZY, EAY, EBY, EZY).

Решению аналогичной задачи - одновременному измерению 3 линейных отклонений позиционирования, путем применения стратегии измерения шагами при движении по диагонали, посвящена работа [191, 194].

2) Прибор К 600 – DMM ф. Nikon Metrology NV [131], в котором используются 3 ПЗС матрицы, расположенные в корпусе на треноге, и минимум 3 «точечные» источника инфракрасного излучения, располагаемые на перемещаемом узле многокоординатной машины. Прибор позволяет измерять положение подвижного узла в пространстве и соответственно отклонения по 3 линейным и 3 угловым координатам. Точность измерений (3D) в объёме 17 м^3 составляет $(0,090 + 0,010L)$ мм, где L – перемещение в м. Указанной точности, как правило, достаточно для проведения калибровки промышленных роботов, но недостаточно для калибровки металлорежущих станков.

На рис. 4.13, показан а) общий вид прибора К 600 – DMM, б) применение прибора для калибровки промышленного робота, в) расположение 3 источников инфракрасного излучения.

3) Прибор Tracker мод. Etalon Laser TRACER [164] ф. ETALON AG (Germany, Braunschweig). С помощью этого прибора удается определять все первичные отклонения механизмов несущей системы (3 линейные координаты) станка с ЧПУ в комплексе и в полуавтоматическом режиме.

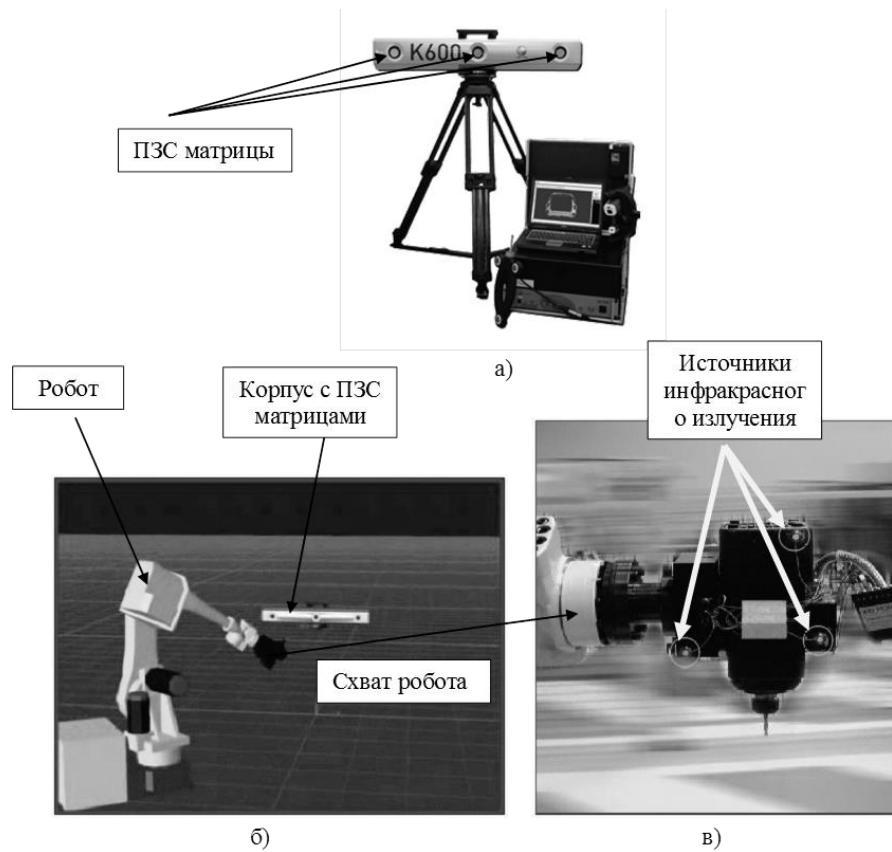


Рис. 4.13. Прибор K 600 – DMM в процессах калибровки промышленного робота[128]

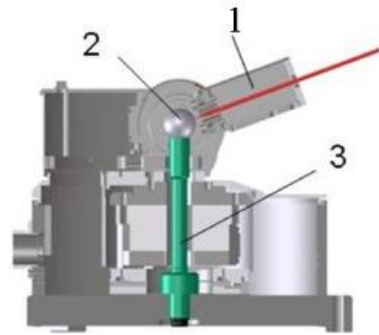
На рис. 4.14, а) показан общий вид прибора Etalon Laser TRACER, а на рис. 4.14, б) приведена конструктивная схема прибора: 1 — лазерный интерферометр, 2 — базовый образцовый шар, 3 — конструктивный элемент опоры шара. На рис. 4.14, в) представлена схема, поясняющая принцип действия прибора. Этот принцип измерений был предложен в работах [44-45] для аттестации промышленных роботов.

Прибор мод. Etalon Laser TRACER имеет следующие характеристики:

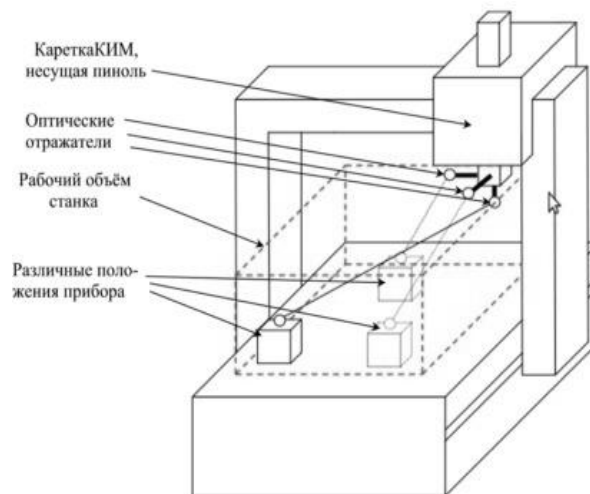
- Разрешающая способность интерферометра 0,001 мкм.
- Базовая образцовая сфера с погрешностью формы $< 0,050$ мкм.
- Допустимая погрешность измерения длины $U = 0.2$ мкм + 0.3 мкм/м ($k=2, 2\sigma$) в диапазоне $0,2$ м ÷ 15 м.
- Вес прибора - 15 кгс, вес контроллера — 10 кгс, высота прибора — 200 мм.



а)



б)



в)

Рис. 4.14. Измерительный прибор мод. Etalon Laser TRACER: а) общий вид прибора, б) схема прибора, в) принцип измерений

Следует отметить, что измерительный прибор мод. Etalon Laser TRACER работает по принципу, основанному на измерении только изменения длины лазерного луча при 4 ÷ 6 положениях прибора в рабочем объёме станка. Эти измерения можно отнести к косвенным измерениям.

4.4. Выводы по главе

1) Представленная классификация методов измерений позволила провести систематизацию средств измерения первичных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ.

2) Выполненная систематизация средств измерений первичных отклонений механизмов существенно облегчает выбор средств измерения для исследования и диагностики точности многокоординатных машин с ЧПУ.

3) За последнее десятилетие наблюдается существенное повышение точности и уровня автоматизации измерений первичных отклонений звеньев механизмов многокоординатных машин с ЧПУ. Существенный успех достигнут в этом направлении на базе оптических измерений с использованием лазерных интерферометров [164, 185] и ПЗС матриц [131], что делает реальным существенный скачок в автоматизации процедуры калибровки многокоординатных машин с ЧПУ.

4) Наблюдается отставание в создании средств измерений первичных отклонений звеньев, входящих во вращательные пары (поворотные столы, поворотные головки, поворотные звенья промышленных роботов и измерительных машин).

5) Разработанные в ИМАШ РАН и ОАО НИАТ, метод и устройство для измерения отклонений от пересечения осей поворота позволяют существенно повысить точность измерений и снизить трудоёмкость измерительных и настроечных операций 5 координатных машин с ЧПУ.

6) Существенные трудности остаются при измерении отклонений от перпендикулярности осей поворота (вращения) в 5 координатных станках.

ГЛАВА V. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ С ЧПУ

После того, как проведены измерения первичных отклонений и осуществлена процедура коррекции первичных отклонений необходимо проверить (оценить) результаты коррекции.

Эта задача решается методами и средствами измерений, применяемыми при измерении «объёмной» точности машины.

Ниже рассмотрены методы и средства измерений позволяющие оценить «объёмную» точность многокоординатного станка с ЧПУ, как характерного представителя многокоординатной машины с ЧПУ [94-95].

5.1. «Объёмная» точность станка

«Объёмная» точность станка - это оценка его точностных возможностей при обработке 3-мерных (3D) «скульптурных» поверхностей. Это определение ввел McKeown в работе [172]. Аналогично в работе [73] отмечается, что «При испытании высокоточных фрезерно-расточных станков была сделана попытка оценить ошибки перемещения органов станка во всем объеме рабочего пространства, там, где может быть установлена обрабатываемая деталь. Такая «объёмная» точность станка, формирование пространственного «поля ошибок» и оценка влияния на них тепловых деформаций является, по мнению проф. Е. А. Матиаса, более полной характеристикой станка».

Критерий оценки «объёмной» точности обработки «скульптурной» поверхности должен показывать степень «близости» точек действительной (обработанной на станке) поверхности и заданной (теоретической) поверхности, которую нужно обработать. В работе [82] в качестве критерия степени близости двух поверхностей предлагается использовать объём пространства, заключённый между этими поверхностями, т.е. выражением вида

$$J = \frac{1}{N} \iint_F |\delta(x, y)| dx dy$$
, где $\delta(x, y)$ - отклонение (погрешность) обработки детали

в точке с координатами x, y ; F – обрабатываемая поверхность. Отклонения $\delta(x, y)$ измеряются по нормали к поверхности (теоретической или действительной).

В отклонения обработанной поверхности $\delta(x, y)$ непосредственно входят (принцип суперпозиции – наложения) отклонения, определяемые станком, и отклонения, связанные с другими источниками, например, с режущим инструментом, приспособлением и обрабатываемой деталью.

Выделить в отклонениях обработанной поверхности $\delta(x, y)$ долю, вносимую станком, и по ней оценивать «объёмную» точность станка, представляет самостоятельную задачу, решению которой посвящено огромное число теоретических и экспериментальных исследований. Ниже рассмотрены некоторые аспекты этой задачи.

5.2. Методы и средства оценки «объёмной» точности станка.

На рис. 5.1 представлены методы оценки «объёмной» точности станка [94-95].

Два метода оценки «объёмной» точности станка основаны на измерении отклонений действительной траектории от «эталонной» на холостом ходу станка. Этими методами являются: 1) метод измерения отклонений с применением калиброванного механизма, 2) метод измерения отклонений с применением образцовой детали.

Третий метод основан на измерении отклонений обработанной поверхности от расчетной. (Измерение «следа» на обработанной поверхности).

Для реализации каждого из представленных методов необходимы:

- прибор сравнения, на который поступают действительное и эталонное значение измеряемой величины,
- мера – материальное воплощение эталонной величины,
- измеряемый объект (станок) – «источник» действительного значения измеряемой величины.



Рис. 5.1. Классификационная схема методов оценки «объёмной» точности станка

В качестве меры применяются:

- 1) образцовая деталь с точно изготовленными функциональной и соединительными поверхностями (эталонная траектория располагается на функциональной поверхности),
- 2) измерительный прибор (устройство), устанавливаемый на станке,
- 3) измерительный прибор, установленный вне станка (координатная измерительная машина, контурограф и др.).

Прибор сравнения зависит от того, какая используется мера:

1) В случае применения образцовой детали – это **измерительные головки**, которые устанавливаются в шпиндель станка и контактируют измерительным наконечником с образцовой деталью.

2) При применении измерительного прибора, установленного на станке - это **компьютер** (вычислительное средство), в котором сравнивается вычисленная по информации с датчиков, траектория движения и эталонная траектория.

3) При применении измерительного прибора, установленного вне станка - это **компьютер прибора**, в котором сравнивается измеренная поверхность на обработанной детали и заданная поверхность.

На рис. 5.2, 5.3 и 5.4 представлены схемы распределения потоков информации в измерительных устройствах, реализующих рассмотренные методы измерения отклонений воспроизведения эталонной траектории. Здесь: $R_3(x_3, y_3, z_3)$ – заданная поверхность, $R_d(x_d, y_d, z_d)$ – действительная поверхность, d_s – отклонение действительной поверхности от заданной.

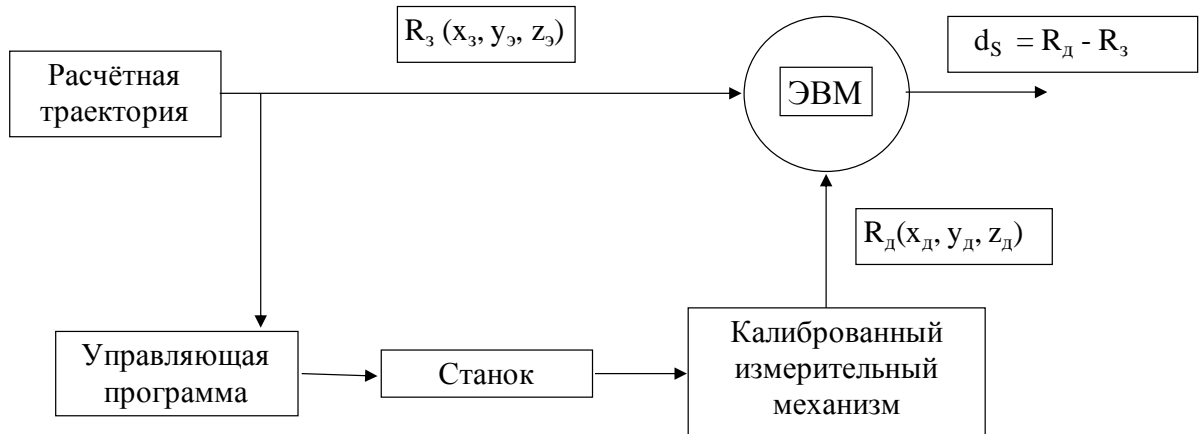


Рис. 5.2. Схема потоков информации при способе измерения отклонений воспроизведения эталонной траектории с помощью калиброванного измерительного механизма

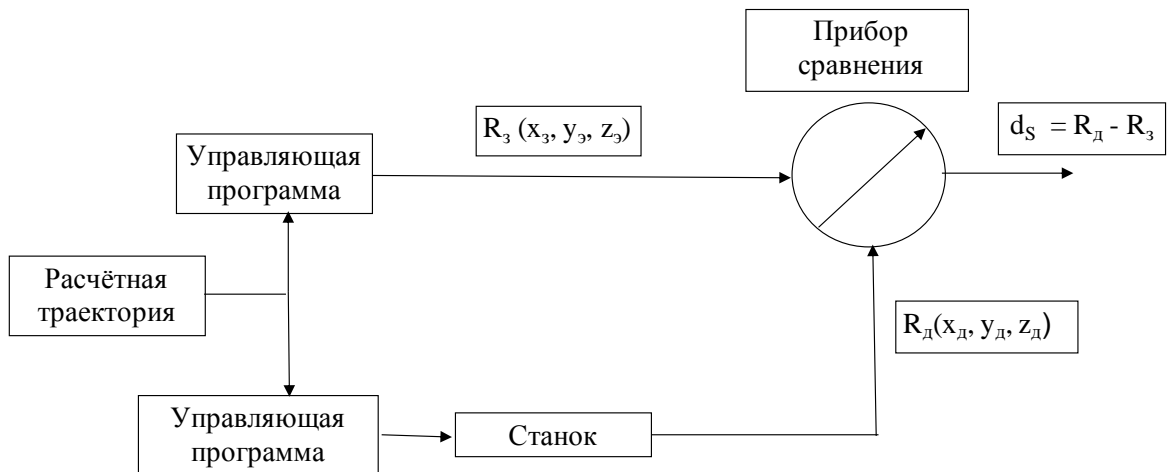


Рис. 5.3. Схема потоков информации при способе измерения отклонений воспроизведения эталонной траектории с помощью образцовой детали и измерительной головки отклонения

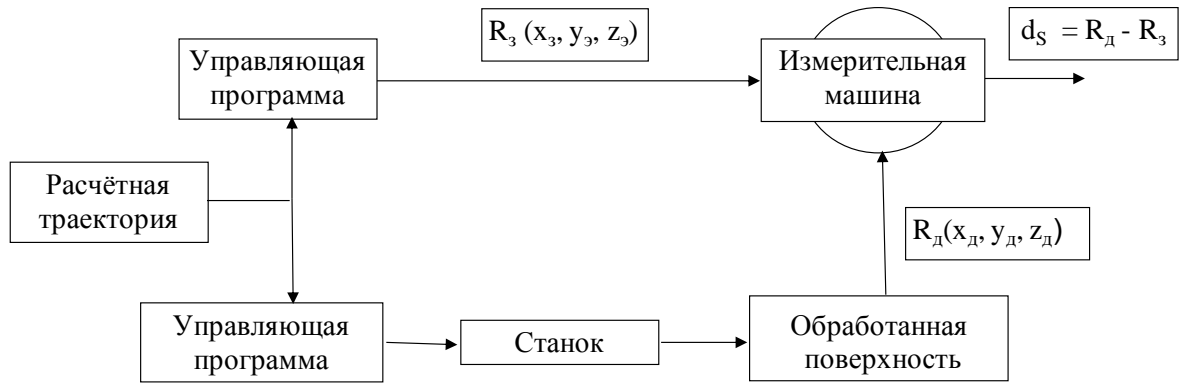


Рис. 5.4. Схема потоков информации при оценке объёмной точности станка с помощью обработки поверхности на специальном образце и последующем её измерении на КИМ или контурографе

Ниже последовательно рассмотрены приборы (устройства), реализующие рассмотренные три метода оценки «объёмной» точности станка.

5.2.1 Оценка объёмной точности станка измерением отклонений воспроизведения эталонной траектории

5.2.1.1. Приборы, реализующие способ измерения с применением калиброванного механизма

Рассмотрение приборов (устройств), реализующих способ измерения с применением калиброванного механизма, будем проводить в соответствии с предложенной ниже классификацией.

Всё множество приборов, реализующих способ измерения с применением калиброванного механизма, можно разбить на группы в соответствии с количеством степеней подвижности, реализуемых в используемом механизме, и в зависимости от того, какими кинематическими парами они реализуются (поступательными или вращательными). В табл. 5.1 представлено разбиение всего множества приборов на группы в соответствии с указанными признаками.

Группа приборов с нулевой степенью подвижности L_0C_0 не реализуема (число степеней подвижности равно 0).

Группа приборов со степенью подвижности равной 1: две структуры L_0C_1, L_1C_0 .

Табл. 5.1

Разбиение множества приборов на группы по количеству поступательных и вращательных пар

		Поступательные пары (L)			
		0	1	2	3
Вращательные пары (C)	0	L_0C_0	L_1C_0	L_2C_0	L_3C_0
	1	L_0C_1	L_1C_1	L_2C_1	
	2	L_0C_2	L_1C_2		
	3	L_0C_3			

Группа приборов со степенью подвижности равной 2: три структуры L_0C_2 , L_1C_1 , L_2C_0 .

Группа приборов со степенью подвижности равной 3: четыре структуры L_0C_3 , L_1C_2 , L_2C_1 , L_3C_0 .

Приборы для измерения отклонений воспроизведения эталонной траектории строятся таким образом, что с помощью их измеряются координаты точки однозначно связанной с исполнительным органом машины (станка). Практически - это центр шара, жестко закрепленного на выходном звене механизма прибора. Этот шар соединяется с конусом, жестко закреплённым в исполнительном органе станка (чаще всего в шпинделе), удерживается в соприкосновении магнитом и, таким образом, образуется сферическая кинематическая пара соединения выходного звена прибора с исполнительным органом станка, траектория движения которого измеряется относительно другого исполнительного органа, на котором крепится основание (стойка) механизма прибора.

5.2.1.1.1. Приборы со степенью подвижности 1

Приборы структуры L_0C_1

Таковыми приборами являются датчики углового перемещения (угла). Они могут использоваться для исследования движения по угловым координатам.

нат машины (станка). Характерным примером такого прибора может служить датчик мод. RON 905 фирмы Heidenhain GmbH (Germany). Конфигурация системы измерения в этом случае представлена на рис. 5.5.

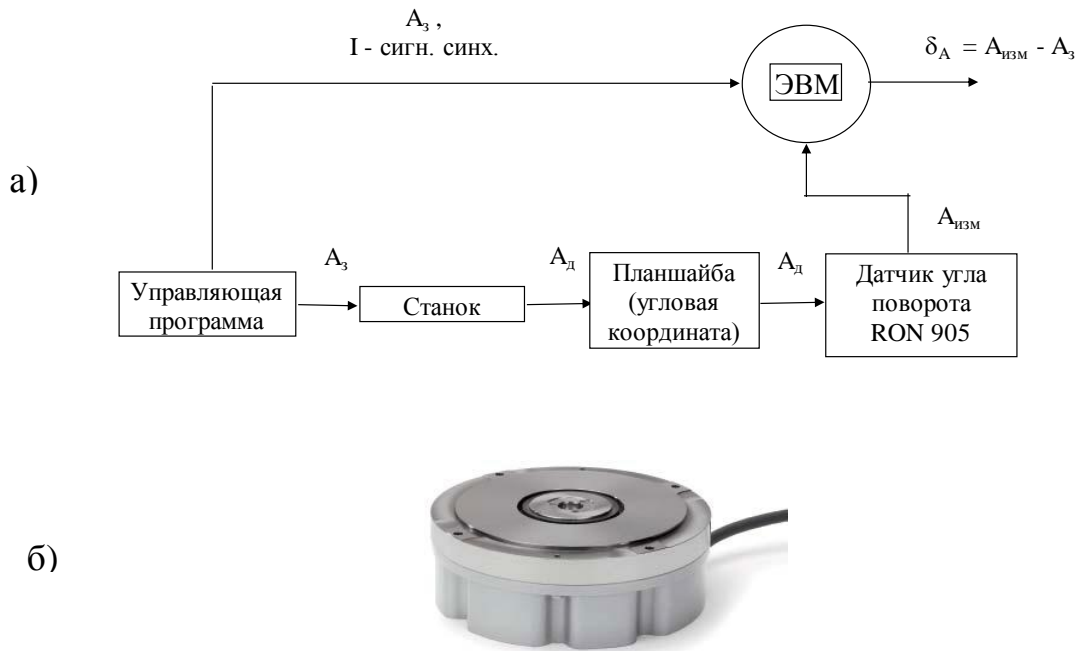


Рис. 5.5. Измерение угла поворота планшайбы: а) блок-схема, б) датчик угла поворота мод. RON 905, устанавливаемый на поворотном узле станка

Датчик угла поворота мод. RON 905 является надежным устройством и отличается высокой точностью $\pm 0.4''$ (допустимая погрешность измерения угла поворота в диапазоне 360°).

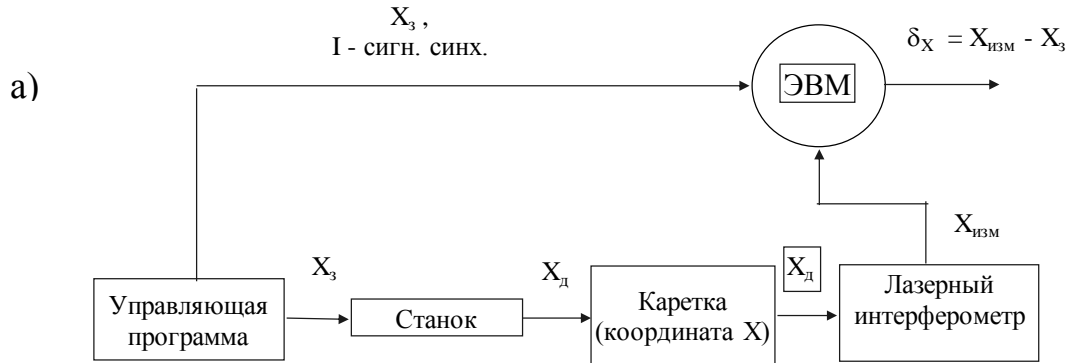
Другим примером измерительного прибора данной структуры может быть линейный интерферометр с угловой оптикой. Однако, здесь мы имеем маленький диапазон измерений $\pm 10^\circ$ при точности измерения: $\pm (0.006A \pm 0.5 \pm 0.1M)$ мкм/м, где A - измеряемый угол (мкм/м), M – расстояние от расщепителя луча до оптического отражателя в м ($1 \text{ мкм/м} = 0.2 \text{ угловая сек.}$).

С помощью указанных приборов можно записывать переходные процессы, т.е. кривые разгона и торможения при обработке угловых координат ($A = A(t)$). Однако, для выделения отклонения необходимо реализовывать вычислительную процедуру: $\delta A = A_{\text{изм}} - A_z$, для выполнения которой необхо-

можно синхронизировать запись заданного сигнала угла поворота - A_3 и сигнала измерения угла поворота $A_{изм}$.

Приборы структуры L_1C_0

Характерным примером прибора такой структуры является лазерный интерферометр с линейной оптикой (рис. 5.6).



б)

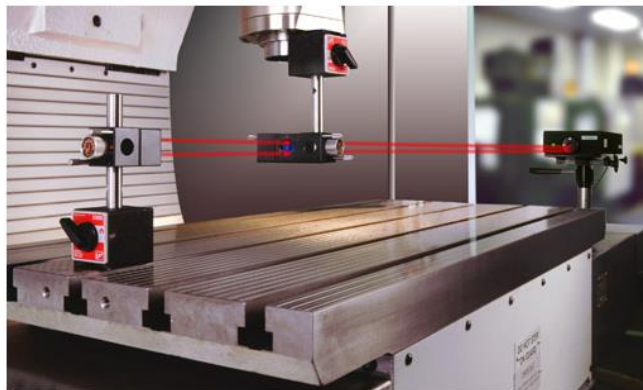


Рис.5.6. Измерение перемещения по координате X : а) блок-схема измерений, б) схема измерений перемещений $x(t)$ с помощью лазерного интерферометра, работающего в режиме «динамических измерений характеристик станка»

С помощью лазерного интерферометра можно записывать переходные процессы, т.е. кривые разгона и торможения при обработке линейных координат ($X = X(t)$). Однако для оценки отклонений от заданного движения вдоль координаты необходимо осуществлять синхронизацию записи сигнала с датчика и программы управления станком и осуществлять операции вычисления.

5.2.1.1.2. Приборы со степенью подвижности 2

Приборы структуры L_0C_2

Такой прибор по конструкции аналогичен роботу типа «Skara», в котором вместо двигателей вращательного движения установлены датчики углового положения. На рис. 5.7, а) представлена структурная схема взаимодействия прибора L_0C_2 с исполнительными органами станка.

Здесь: 1 – Подставка со сферическим шарниром, устанавливаемая на стол станка, 2 – первое поворотное звено, 3 – второе поворотное звено, 4 – стойка станка (координата Y), несущая шпиндель, который связывается с звеном 3 через сферический шарнир, 5 – каретка (координата X), движущаяся по станине.

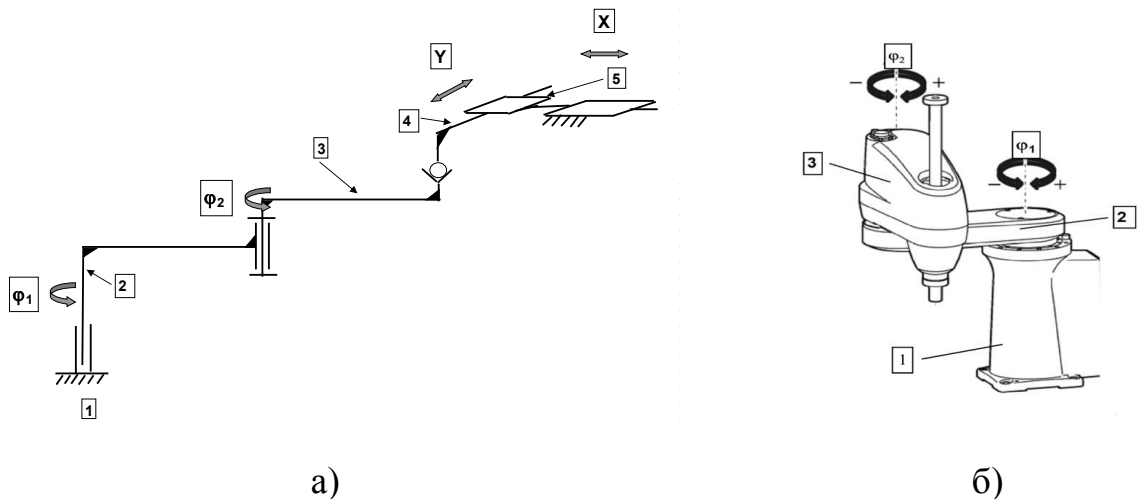


Рис. 5.7. Прибор L_0C_2 : а) структурная схема, б) общий вид робота мод. KR 5 SCARA 350 ф. Kuka roboter GmbH (Germany)

На рис. 5.7, б) изображен общий вид робота мод. KR 5 SCARA 350 ф. Kuka roboter GmbH (Germany). Прибор прост в конструкции и может быть удобен в эксплуатации, однако, имеет «мертвые» точки, когда звено 2 и 3 расположены на одной прямой.

Механизм прибора имеет 2 степени подвижности ($W = 2$):

$$W = 6 \cdot n - (5 \cdot p_1 + 4 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 2 \cdot p_4 + p_5),$$

где:

$n = 4$ - число подвижных звеньев,

$p_1 = 3$ - число кинематических пар с 1 степенью подвижности,
 $p_2 = 1$ - число кинематических пар с 2 степенями подвижности
 (цилиндрический шарнир),

$p_3 = 1$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности
 (сферическая пара),

$p_4 = 0$ - число кинематических пар с 4 степенями подвижности,

$p_5 = 0$ - число кинематических пар с 5 степенями подвижности.

$$W = 6 \cdot 4 - (5 \cdot 3 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1) = 24 - 22 = 2.$$

Приборы структуры L_1C_1

Такую структуру имеет прибор QC-10 ф. “Renishaw” (England) [76], получивший широкое применение для измерения отклонений от «эталонной окружности» на станке с ЧПУ. Приборы этого типа получили название «allbar». На рис. 5.8, а) представлен общий вид прибора QC 10, на рис. 5.8, б) - структурная схема механизма прибора, а на рис. 5.8, в) результаты измерения отклонений от эталонной окружности в пл. XY на скорости обхода контура $S = 1000$ мм/мин на станке мод. MC – 300.

Звено 1 – стойка, несущая шарик, устанавливается, как правило, на стол станка. К этому шарiku магнитом притягивается конус звена 2. Звено 2 и звено 3 соединяются между собой через индуктивный датчик. На конце звена 3 расположен шарик, который магнитом подвижно соединяется с конусом звена 4.

Звено 4 устанавливается в шпиндель станка и может совершать взаимосвязанные движения по координатам X, Y, Z, по эталонной траектории, расположенной на сфере номинального диаметра. Отклонения от эталонной траектории на сфере номинального диаметра воспринимаются индуктивным датчиком.

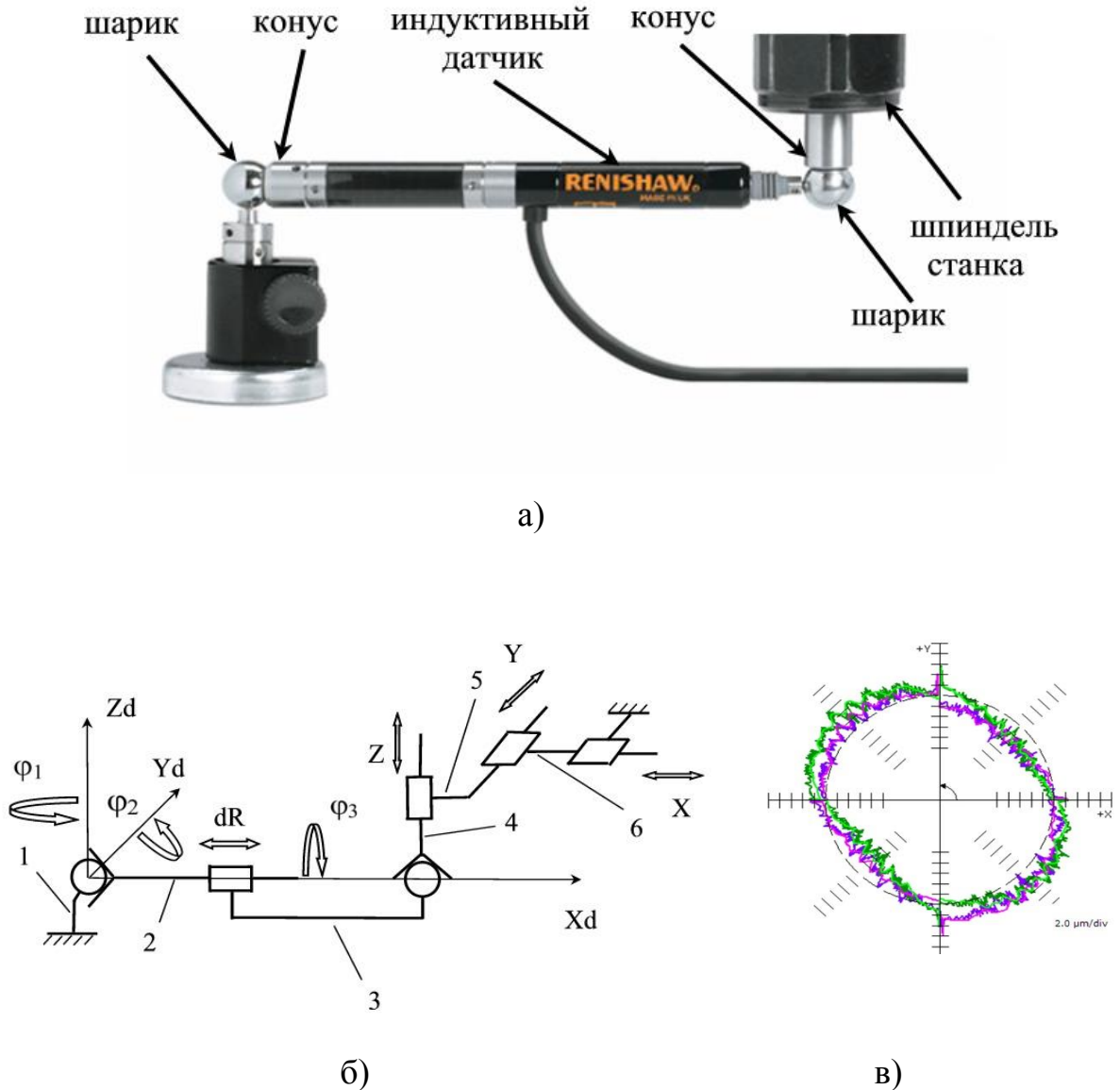


Рис. 5.8. Прибор мод. QC-10 для измерения отклонений от «эталонной окружности»: а) общий вид прибора, б) структурная схема прибора QC-10 в его взаимодействии с исполнительными органами станка, в) результаты измерения отклонений от эталонной окружности в пл. XY на скорости обхода контура $S = 1000$ мм/мин на станке мод. MC – 300

Механизм прибора при измерении отклонений от эталонной траектории на сфере номинального диаметра имеет 4 степени подвижности ($W = 4$):

$$W = 6 \cdot n - (5 \cdot p_1 + 4 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 2 \cdot p_4 + p_5),$$

где:

$$n = 5 - \text{число подвижных звеньев,}$$

$p_1 = 4$ - число кинематических пар с 1 степенью подвижности,

$p_3 = 2$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности

(сферическая пара),

$$p_2 = p_4 = p_5 = 0.$$

$$W = 6 \cdot 5 - (5 \cdot 4 + 3 \cdot 2) = 30 - 26 = 4.$$

Здесь:

- dR – перемещение штока в индуктивном датчике, равное отклонению действительной траектории от номинальной окружности (калиброванного значения R),
- угол поворота φ_1 звена 2 вокруг оси Z_d (система координат X_d, Y_d, Z_d связана с прибором, ось X_d проходит через центры шаров, ось Y_d параллельна пл. XY),
- угол поворота φ_2 звена 2 вокруг оси Y_d ,
- поворот φ_3 звена 2 и 3 вокруг оси X_d .

Ф. “Renishaw” поставляет прибор с математическим обеспечением, позволяющим работать в режиме измерений отклонений от эталонной окружности, расположенной в плоскости.

При присоединении прибора QC-10 к исполнительным органам станка, как показано на рис. 5.8, б), у механизма прибора для измерения отклонений воспроизведения эталонной окружности используются лишь 2 степени подвижности:

1 – перемещение в индуктивном датчике dR – отклонения воспроизведения эталонной окружности,

2 – поворот звена 2 вокруг оси Z_d – параметр, «привязывающий» отклонения воспроизведения эталонной окружности к точке на окружности (расчетный).

Поворот звена 2 вокруг оси Y_d используется для компенсации отклонения воспроизведения эталонной окружности вдоль оси Z_d , вызванные станком, а поворот звена 2 вокруг оси X_d используется для «разматывания»

шнура питания. Основные технические характеристики прибор QC-10 [76] следующие:

- скорость считывания и записи информации при движении исполнительных органов станка - 250 точек/сек,
- номинальные радиусы окружности (расстояние между центрами шаров): 50, 100, 150, 250, 400 мм,
- допустимая величина перемещения штока $-1,25/+1,75$ мм,
- разрешающая способность (дискретность) – 0,1 мкм
- диапазон измерения ± 1 мм
- точность измерений отклонений от эталонной траектории «окружность» составляет $\pm 1,0$ мкм (при 20°C).

Прибор QC-10 позволяет измерять отклонения воспроизведения «эталонной окружности» в плоскости, произвольно расположенной в рабочем объёме станка, но строго фиксированных радиусов. Однако, как правило, при испытаниях станка окружность располагают в координатных плоскостях (XY, XZ, YZ).

Приборы структуры L_2C_0

Прибор мод. Measuring Systems for Inspecting Linear Axes KGM 181 and KGM 182 Grid Encoders ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH [173] имеет структуру L_2C_0 . Он позволяет измерять отклонения от плоской траектории в круге $\varnothing 140$ мм и $\varnothing 230$ мм с точностью ± 2 мкм на скорости до 80 м/мин. На рис. 5.9, а) представлен общий вид прибора «Grid Encoders KGM». Считывающая головка устанавливается в шпиндель станка и совершает плоскопараллельное движение (L_2) относительно измерительной «решётки», нанесённой на диск, устанавливаемый на столе станка.

На рис. 5.9, б) приведена схема присоединения прибора к станку.

Здесь: 1- стол станка, на который устанавливается плита с «измерительной решёткой», 2 – шпиндель станка, к которому жестко присоединяется измерительная головка, 3 – стойка станка (координата Y), 4 – каретка станка (координата X).

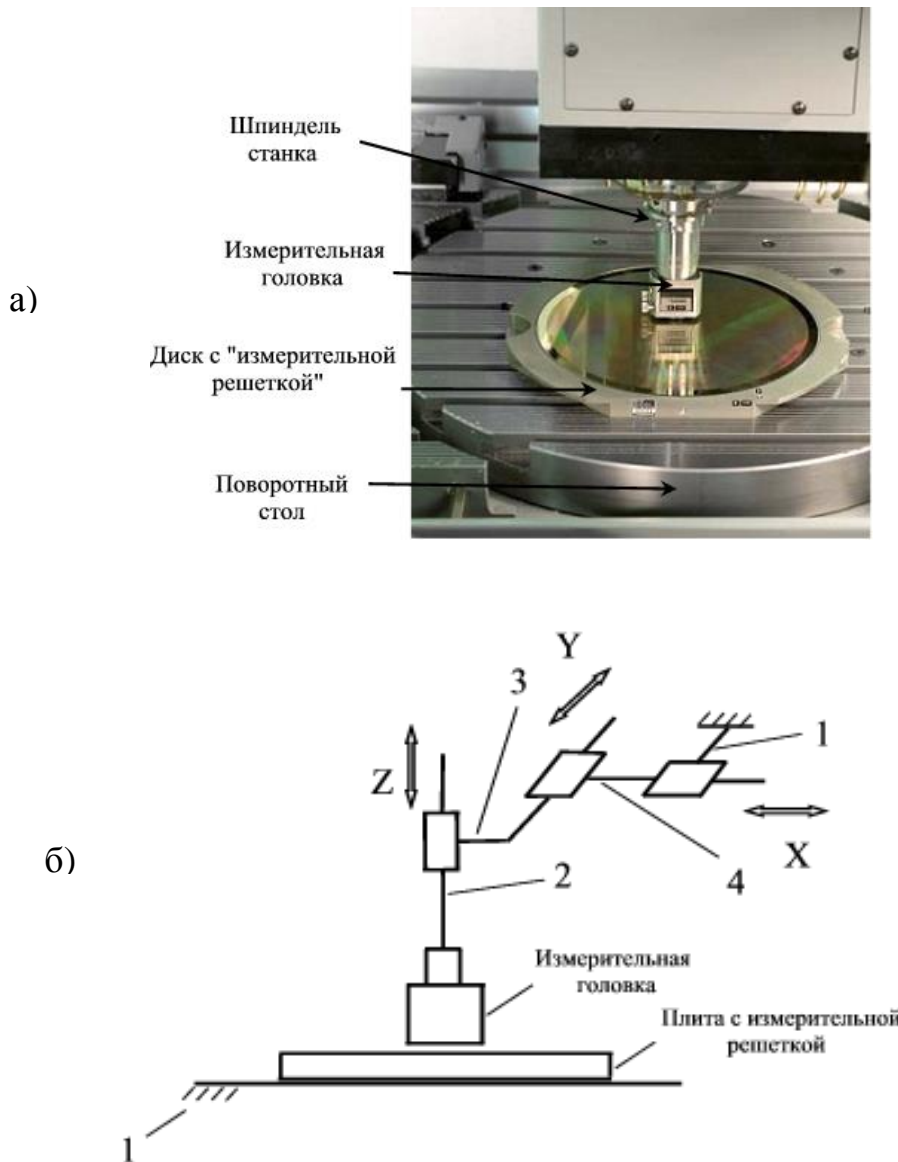


Рис. 5.9. Прибор «Grid Encoders KGM» ф. Heidenhain GmbH (Germany):
а) общий вид прибора, установленного на столе станка, б) схема присоединения прибора к станку

Прибор Grid Encoders KGM позволяет исследовать станок на точность отработки траектории в различных динамических режимах и, в частности, на круговой траектории, как и с помощью прибора QC 10 ф. Renishaw. Только у прибора Grid Encoders KGM радиус окружности может быть произвольным в диапазоне 115 – 0,1 мм. Особо следует отметить, что измерительная «решётка» выполнена из материала, имеющего температурный коэффициент линейного расширения равный $\alpha_e = 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Результаты измерений мало зависят от температуры окружающей среды.

Другим примером прибора структуры L_2C_0 является прибор LB-500 (Laser/Ballbar) [176] ф. Optodyne, Inc. (USA), разработанный на базе лазерного устройства MCV-500 (лазерное устройство для измерения перемещений, работающее на принципе Доплера). Прибор предназначен для измерения отклонений от «эталонной плоской траектории», в частности, окружности.

Точностные возможности прибора следующие: точность измерения линейных перемещений – 1 мкм, дискретность отсчёта – 0,01 мкм, диапазон измерения – 1 м, частота опроса – 1000 значений/сек.

Данный прибор имеет точностные возможности, аналогичные прибору QC-10. ф. Renishaw. Прибор ориентирован на измерение отклонений от эталонной окружности любого радиуса в определенном диапазоне, но может использоваться для измерения отклонений по радиус-вектору при воспроизведении любой траектории в плоскости.

Для проведения измерений необходимо наличие двух лазерных интерферометров и двух отражающих зеркал. Схема измерений представлена на рис. 5.10.

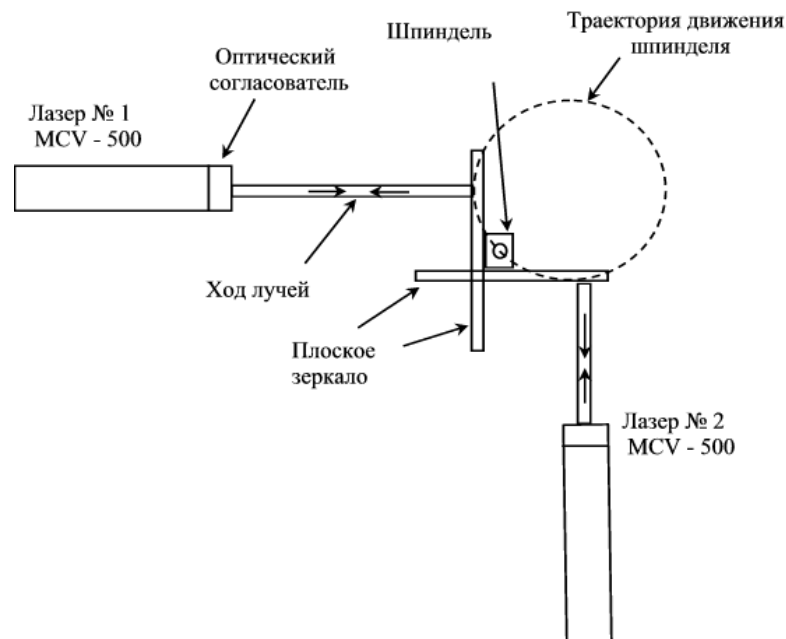


Рис. 5.10. Схема измерений отклонений от эталонной окружности с использованием прибора LB-500 ф. Optodyne, Inc

Можно отметить, что измерения отклонений от эталонной окружности по схеме ф. Optodyne , Inc. более громоздки, чем по схеме ф. Renishaw. Однако при измерениях по схеме ф. Renishaw отклонения мы получаем по радиусу, а по схеме ф. Optodyne , Inc. отклонения по координатам (ΔX , ΔY) как с помощью прибора «Grid Encoders KGM». В ряде случаев, это является преимуществом.

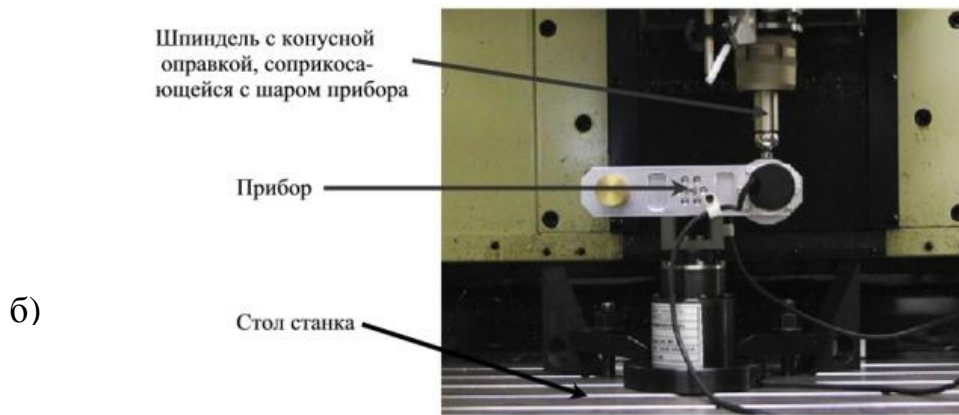
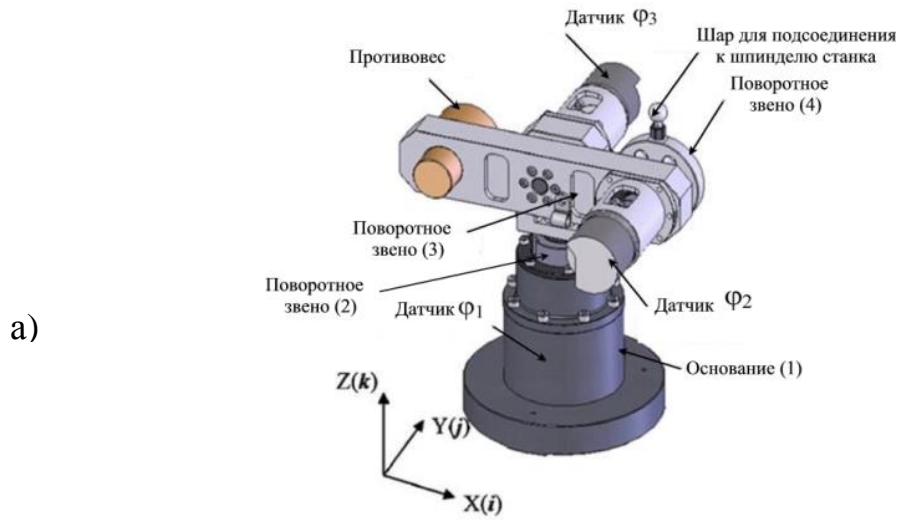
Ещё один прибор (устройство), имеющий структуру L_2C_0 , описан в работе [156]. Устройство содержит два дискретных датчика линейных перемещений, расположенных перпендикулярно друг другу. Датчики крепятся на столе станка, и приводятся в соприкосновение с прецизионным кубиком, установленным в шпинделе. Относительные перемещения шпинделя и стола станка измеряются с помощью дискретных датчиков линейных перемещений и вводятся в компьютер устройства, где рассчитываются отклонения действительной плоской траектории от запрограммированной. По данным [156] описанное устройство позволяет исследовать влияние динамики приводов на отклонения действительной траектории от запрограммированной и может использоваться наряду с традиционным прибором «ballbar».

5.2.1.1.3. Приборы со степенью подвижности 3

Приборы структуры L_0C_3

В работе [154] описан метод и прибор структуры L_0C_3 для измерения отклонений от траектории движения в пространстве (ΔX , ΔY , ΔZ) (the rotary encoder and link mechanism (RELM)). На рис. 5.11, а) показана схема расположения датчиков и поворотных звеньев механизма прибора, а на рис. 5.11, б) представлен общий вид прибора, установленного на столе станка. Структурная схема механизма прибора, показана на рис. 5.12.

Соединение прибора со станком осуществляется путем крепления основания на столе станка и присоединения стального шарика к шпинделю станка с помощью конуса и магнита.



а)

б)

Рис. 5.11. Прибор RELM: а) схема расположения датчиков и поворотных звеньев механизма, б) общий вид прибора

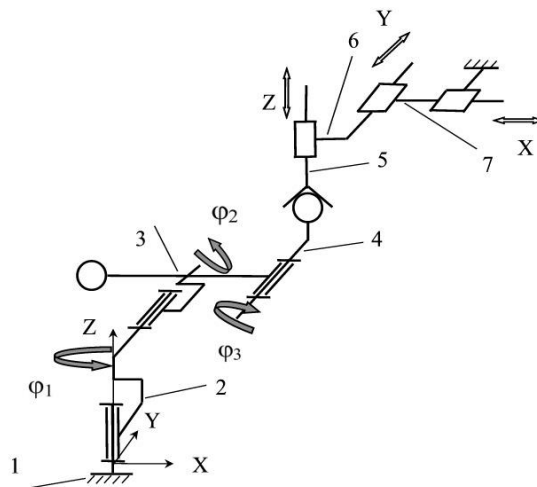


Рис. 5.12. Структурная схема прибора RELM и несущей системы станка, имеющего 3 линейные координаты (X , Y , Z)

На рис. 5.12: 1 – основание, закрепленное на неподвижном столе станка, 2 - поворотное звено с вертикальной осью, 3 – поворотное звено с горизонтальной осью и противовесом, 4 - поворотное звено формы диска с горизонтальной осью, 5 - шпиндель станка с конусной оправкой, присоединяющейся к шару прибора с помощью магнита, 6 – стойка, несущая шпиндельную бабку, 7 – салазки, несущие стойку.

Механизм прибора при измерении отклонений от эталонной траектории (X, Y, Z) имеет 3 степени подвижности ($W = 3$, повороты: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$):

$$W = 6 \cdot n - (5 \cdot p_1 + 4 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 2 \cdot p_4 + p_5),$$

где: $n = 6$ - число подвижных звеньев,

$p_1 = 6$ - число кинематических пар с 1 степенью подвижности,

$p_3 = 1$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности (сферическая пара),

$$p_2 = p_4 = p_5 = 0.$$

$$W = 6 \cdot 6 - (5 \cdot 6 + 3 \cdot 1) = 36 - 33 = 3.$$

Прибор калибруется. В процессе калибровки определяются 11 параметров (размеров) звеньев механизма прибора. В соответствии с ними, уточняются параметры кинематической модели расчета отклонений $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ действительной траектории от номинальной.

Предложенный метод и прибор были опробованы на тестовых задачах измерения эталонных траекторий [154]. Результаты измерений сопоставимы с результатами, получаемыми с помощью приборов «double ballbar» и «Grid Encoders KGM».

Приборы структуры L_1C_2

В работе [160] описан прибор структуры L_1C_2 для измерения отклонений от траектории движения в пространстве, в котором используются лазерный интерферометр и два датчика угла поворота. Структурная схема механизма прибора и его связи с механизмами несущей системы станка, имеющего 3 линейные координаты (X, Y, Z), представлена на рис. 5.13.

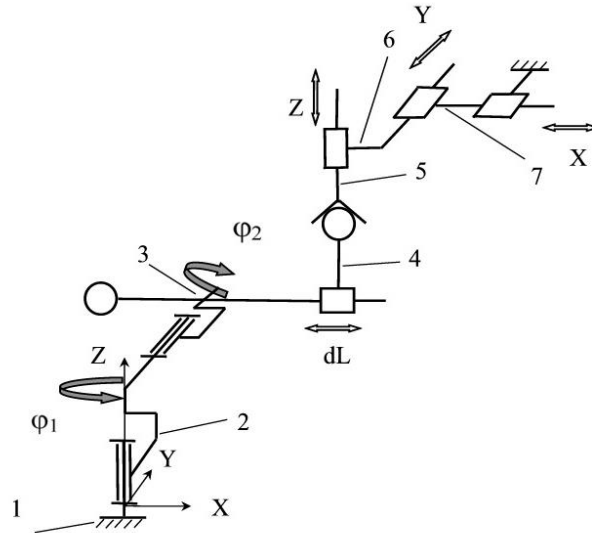


Рис. 5.13. Структурная схема механизма прибора (L_1C_2)

Основу прибора составляет механизм с 3 степенями подвижности: две степени обеспечиваются вращательными парами и одна – поступательной парой. ($W = 3$, линейное перемещение dL и повороты: φ_1 , φ_2):

$$W = 6 \cdot n - (5 \cdot p_1 + 4 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 2 \cdot p_4 + p_5),$$

где: $n = 6$ - число подвижных звеньев,

$p_1 = 6$ - число кинематических пар с 1 степенью подвижности,

$p_3 = 1$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности (сферическая пара),

$$p_2 = p_4 = p_5 = 0.$$

$$W = 6 \cdot 6 - (5 \cdot 6 + 3 \cdot 1) = 36 - 33 = 3.$$

В приборе снимается информация с кругового датчика, установленного на звене 2, о величине угла поворота φ_1 вокруг оси Z , а с кругового датчика, установленного на звене 3, о величине угла поворота вокруг оси Y . С помощью лазерного интерферометра в приборе измеряются перемещения по линейной координате прибора dL . По этой информации рассчитываются отклонения движения исполнительных органов станка от заданной траектории.

Прибор устанавливается основанием 1 на стол станка, а шар, закреплённый на звене 4, соединяется со шпинделем станка с помощью конуса и магнита.

Такую же структуру L_1C_2 имеют прибор Leica Absolute Tracker [168] ф. Leica Geosystems AG (Switzerland) и прибор Laser Tracker V.E.C. ф. Automated Precision Inc. (USA) [195]. Приборы позволяют измерять отклонения от траектории движения в пространстве исполнительных органов машин.

Допустимая погрешность, например, прибора MPE при измерении расстояния вдоль линии лазерного луча составляет ± 10 мкм и перпендикулярно линии лазерного луча ± 15 мкм + 6мкм/м в рабочем диапазоне: 2 ÷ 40 м.

На рис. 5.14 представлен общий вид прибора Laser Tracker V.E.C. при измерении с целью калибровки 5 координатного многоцелевого (фрезерного) станка портальной конструкции мод. MAG UG 1500.

Данный прибор удобен для испытаний и аттестации крупногабаритных станков, используемых, в частности, в аэрокосмической промышленности и в тяжелом и энергетическом машиностроении.



Рис. 5.14. Общий вид прибора Laser Tracker V.E.C.

Фирма ETALON AG (Germany, Braunschweig) разработала прибор Tracker мод. Etalon Laser TRACER [164] (рис. 4.13) для измерения прецизионных станков средних размеров, рассмотренный в главе IV.

Измерительный прибор мод. Etalon Laser TRACER работает по принципу, основанному на измерении только изменения «длины лазерного луча» при 4 ÷ 6 положениях прибора в рабочем объеме станка. Принцип работы прибора соответствует работе приборов структуры L_3C_0 , которые рассматриваются ниже.

Приборы структуры L_3C_0

Лазерный ballbar является дальнейшим развитием прибора ballbar [201]. Прибор имеет конструкцию аналогичную прибору ф. Renishaw. В нём вместо индуктивного датчика применяется лазерный интерферометр. Этот прибор создан в University of Florida, Machine Tool Research Center (USA).

На рис. 5.15 представлена конструкция лазерного ballbar. Здесь: 1- прецизионный шар $\varnothing 25,4$ мм сферического шарнира, 2 - подвижный отражатель, 3 - телескопическое соединение (трубка), 4 - поляризационный расщепитель луча, 5 - оптический кабель от лазера, 6 - четвертьволновая «фазовая» пластинка, 7 - неподвижный отражатель, 8 - оптический кабель к интерферометру.

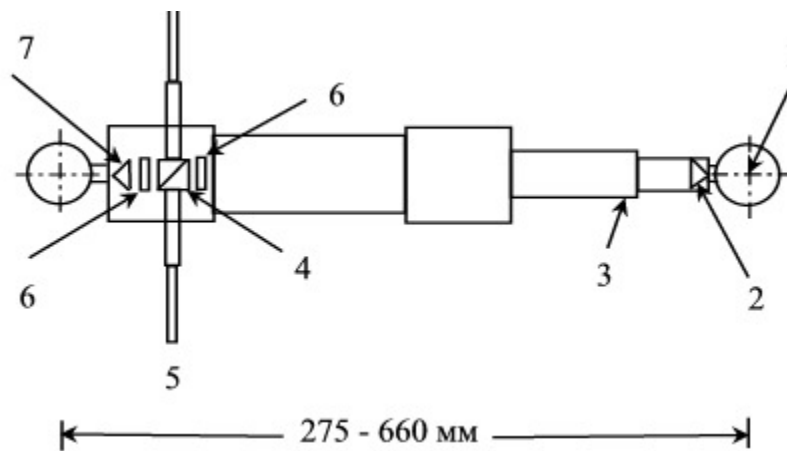


Рис. 5.15. Принципиальная схема прибора «лазерный ballbar»

С помощью прибора «лазерный ballbar» можно измерять точность позиционирования в пространстве (ΔX , ΔY , ΔZ). При этом используется схема измерения, представленная на рис. 5.16, а). Ранее эта схема измерений была предложена в работе [43-44] для аттестации точности роботов (подробное описание представлено в [49]. Процедура измерения включает в себя последовательное измерение расстояний L_1 , L_2 , L_3 и последующее вычисление отклонений в точке позиционирования с использованием точных (калибровочных) значений расстояний L_{b1} , L_{b2} , L_{b3} . Метод трилатерации развит в работах [138-139].

Эта же схема измерений может использоваться для оценки точности воспроизведения траектории движения исполнительного органа станка. Однако при этом не удастся достигнуть требуемой точности измерений. Неточность возникает в результате существенной нестабильности начальных условий последовательных прогонов движения по траектории при установке прибора для измерений расстояний L_1 , L_2 , L_3 . Для повышения точности измерений был предложен модифицированный прибор с использованием 3-х лазерных интерферометров. Принципиальная схема измерений представлена на рис. 5.16, б).

В работе [162, 182, 183] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований точности воспроизведения пространственной траектории движения на станке с ЧПУ с использованием прибора «лазерный ballbar». Результаты экспериментальных исследований говорят о «микронном» уровне точности измерений воспроизведения пространственной траектории.

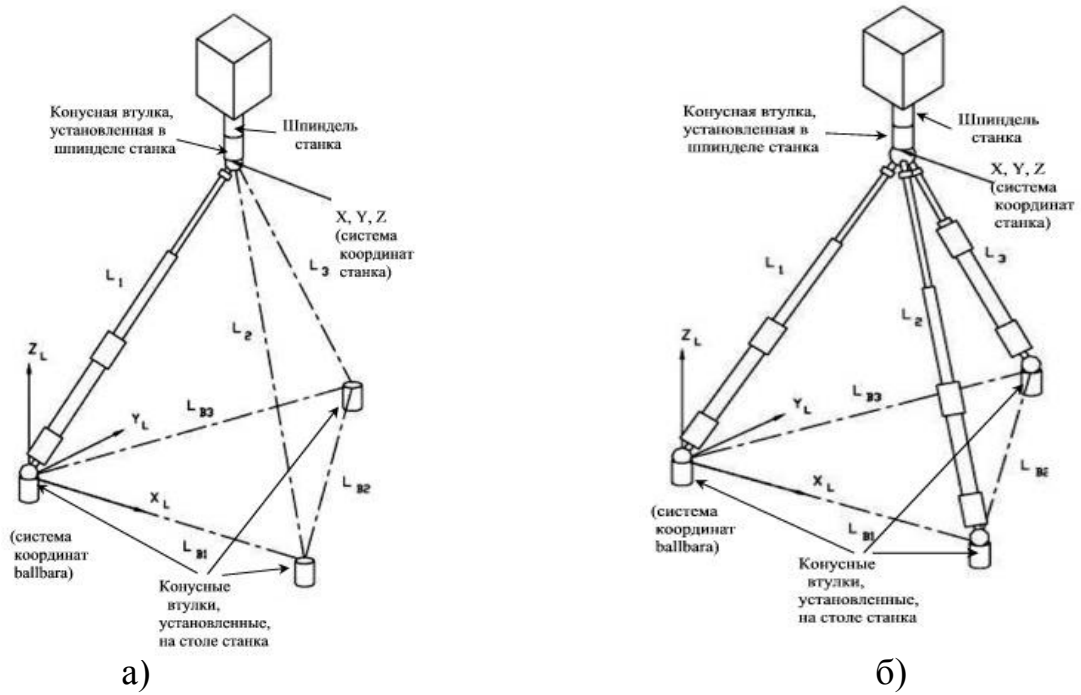


Рис. 5.16. Схемы измерений с помощью прибора «лазерный ballbar»: а) схема измерения отклонений позиционирования в пространстве с помощью прибора с одним лазерным интерферометром, б) схема измерения отклонений позиционирования в пространстве (отклонений траектории) с тремя лазерными интерферометрами (модифицированный прибор)

На рис. 5.17 представлена структурная схема механизма модифицированного прибора «лазерный ballbar».

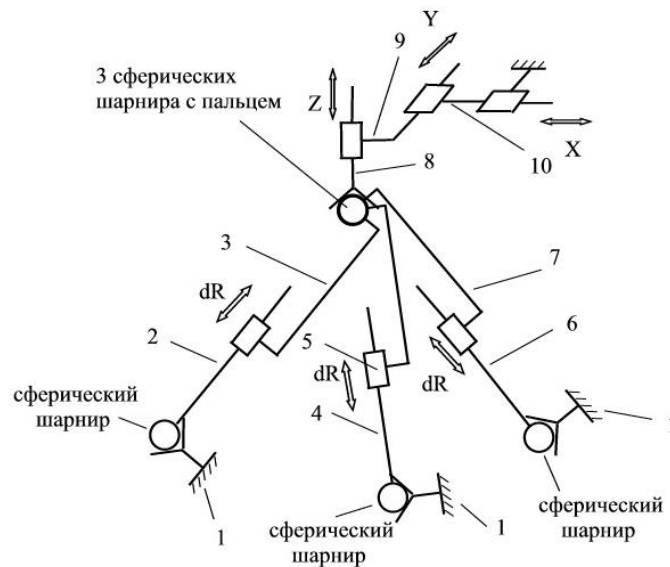


Рис. 5.17. Структурная схема механизма модифицированного прибора «лазерный ballbar»

Здесь: 1- стол, на котором установлены конусные втулки, 2, 4, 6 – прецизионные шары со штоками, телескопически связанные с другими прецизионными шарами со штоками 3, 5, 7, входящими в совмещённый сферический шарнир с пальцем, 8 – конус, устанавливаемый в шпиндель станка и соединяемый с совмещённым сферическим шарниром с пальцем по средством магнита, 8, 9, 10 – привода станка по координатам X, Y, Z.

Механизм прибора имеет 3 степени подвижности.

$$W = 6 \cdot 9 - (5 \cdot 6 + 4 \cdot 3 + 3 \cdot 3) = 54 - 51 = 3,$$

$n = 9$ - число подвижных звеньев,

$p_1 = 6$ - число кинематических пар с 1 степенью подвижности (поступательные пары),

$p_2 = 3$ - число кинематических пар с 2 степенями подвижности (сферический шарнир с пальцем),

$p_3 = 3$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности (сферический шарнир),

$$p_4 = p_5 = 0.$$

Три степени подвижности прибора соответствуют 3 степеням подвижности несущей системы станка с линейными координатами X, Y, Z. Соединение станка и прибора осуществляется через совмещённый сферический шарнир с пальцем (три в одном).

Возможно построение прибора (устройства) со структурой механизма L_3C_0 , в котором применяются лишь поступательные пары. Это случай дальнейшего развития устройства [156]. Структурная схема устройства представлена на рис. 5.18. Здесь: 1 – неподвижный стол, на котором установлены датчики 2, 3, 4 по координатам X, Y, Z. Штоки датчиков соприкасаются с тремя гранями прецизионного куба 5, расположенного в шпинделе станка, перемещающемся звеньями 5, 6 и 7 по координатам Z, Y и X. Устройство в отличие от [156] дополняется дискретным датчиком линейных перемещений по координате Z.

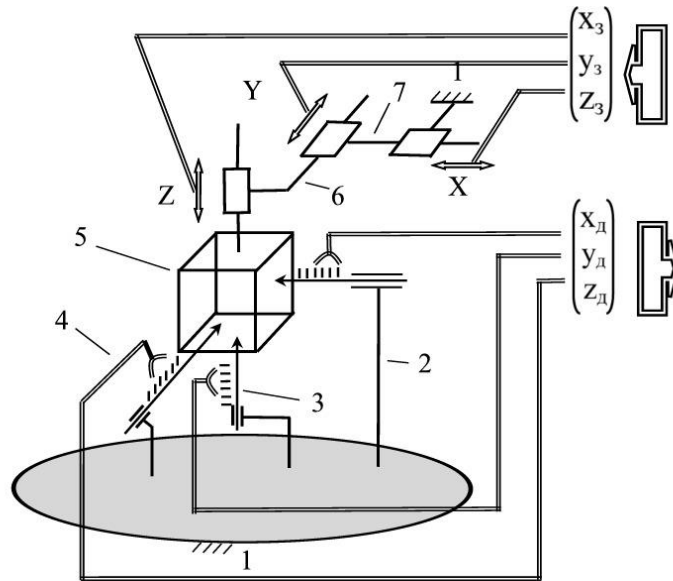


Рис. 5.18. Структурная схема механизма L_3C_0 , в котором применяются поступательные пары

К этой схеме L_3C_0 приводится и устройство, предложенное ф. IBS Precision Engineering и ф. Lion Precision (Netherlands) [171], предназначенное для оценки точностных параметров поворотных столов 5 координатных станков. На рис. 5.19, а) представлен общий вид устройства, а на рис. 5.19, б) его структурная схема: 1- станина, 2 – корпус планшайбы, 3 – планшайба, 4 – образцовый шар, 5 - ёмкостной датчик МТР-003, установленный в шпинделе, 6 – привод по Y, 7 – привод по X.

Процедура использования указанного устройства является следующей:

I) Рассчитывается траектория движения центра образцового шара в системе координат (X, Y, Z) при ведущих движениях φ_1 , φ_2 планшайбы (ось С) и поворотного стола (ось В), исходя из номинального положения осей С и В и номинального положения центра шарика относительно планшайбы.

II) Движение шпинделя с ёмкостным датчиком осуществляется с помощью приводов линейных координат (X, Y, Z) по сигналу, снимаемому с ёмкостного датчика, в соответствии с алгоритмом, «направленным» на уменьшение сигнала с ёмкостного датчика. Движение проводится в режиме

слежения, аналогично тому, как это осуществляется в КИМ ф. ZEISS [147, 48]. Ведущей координатой является одна или две (взаимосвязанные) поворотные координаты.

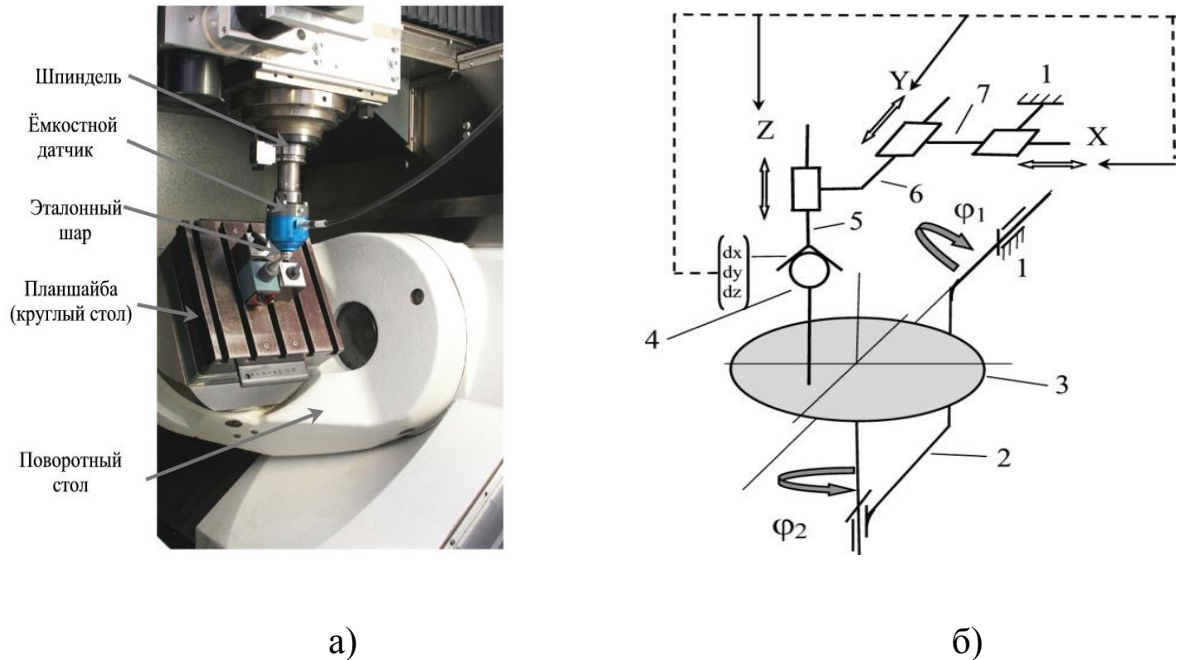


Рис.5.19. Устройство для оценки точностных параметров поворотных столов 5 координатных станков: а) общий вид устройства, установленного на станке, б) структурная схема устройства при его взаимодействии со станком

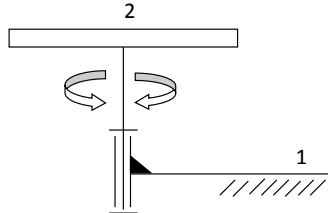

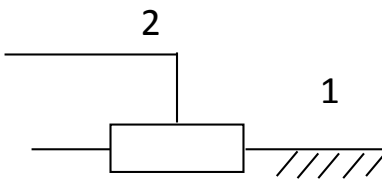
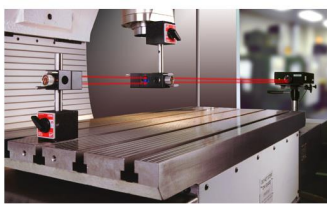
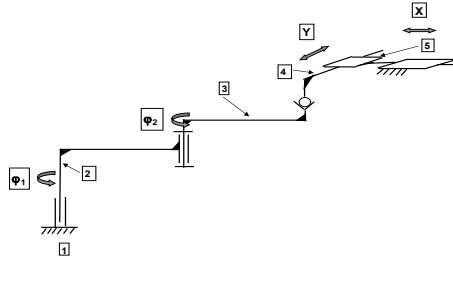

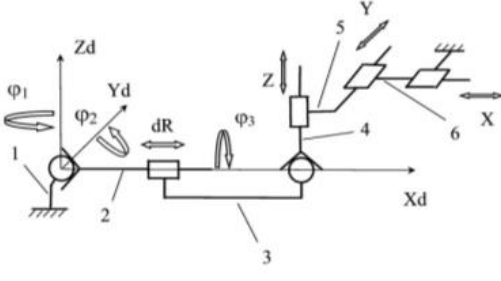

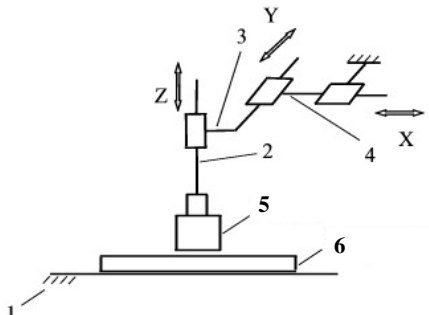

III) Действительная траектория движения центра шарика определяется из текущих координат (X, Y, Z) (сигналы с датчиков обратной связи по линейным координатам X, Y, Z) и отклонений (dX, dY, dZ) , снимаемых с ёмкостного датчика.

IV) Отклонения действительной траектории движения центра шарика от номинальной траектории являются исходной информацией для расчёта отклонений действительного расположения осей C и B в системе координат (X, Y, Z) .

В табл. 5.2 сведены воедино примеры реализации измерительных приборов с применением калиброванного механизма.

Табл. 5.2

Примеры реализации измерительных приборов с применением калиброванного механизма

Структура	Структурная схема	Реализация
L ₀ C ₁		 <p>Датчик мод. RON 905 фирмы Heidenhain GmbH</p>
L ₁ C ₀		 <p>Лазерный интерферометр, работающий в режиме «динамических измерений»</p>
L ₀ C ₂		 <p>Измерительное устройство типа робот SCARA</p>
L ₁ C ₁		<p>Прибор ballbar</p> 
L ₂ C ₀		 <p>Прибор «Grid Encoders KGM» ф. Heidenhain GmbH</p>

		Продолжение табл. 5.2
L_0C_3		<p style="text-align: right;">Прибор RELM</p>
L_1C_2		<p style="text-align: center;">Laser Tracker V.E.C.</p>
L_2C_1		Не реализован
L_3C_0		<p>Модифицированный прибор ballbar с 3 лазерными интерферометрами</p> <p style="text-align: center;">275 - 660 мм</p>

Из табл. 5.2 видно, что наблюдается интенсивное развитие приборов для измерения отклонений траектории в пространстве. Созданные приборы позволяют измерять линейные интегральные отклонения взаимного распо-

ложения ИО многокоординатной машины. Следует отметить, что широкое применение в настоящее время в промышленности нашли приборы структуры L_1C_1 , L_2C_0 и L_1C_2 , которые наряду с измерением медленно меняющихся во времени отклонений позволяют измерять колебания, возникающие при отработке эталонных траекторий. Однако совершенно отсутствуют приборы для измерения интегральные отклонения взаимного расположения ИО машины при совместной работе 5 координат.

5.2.1.2. Приборы, реализующие способ измерения с применением образцовой детали (artifact)

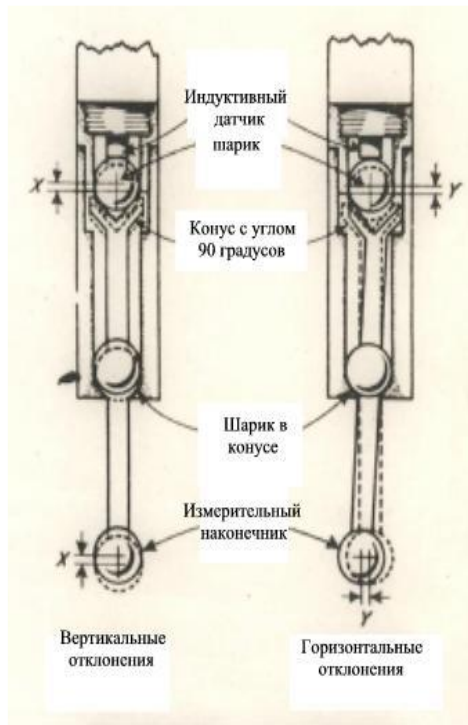
Сразу после появления станков с ЧПУ (1960-е годы) возникла острая необходимость иметь средства измерения деталей, обрабатываемых на них. Одна из идей, возникшая в то время, состояла в использовании того же самого станка, на котором проводится обработка деталей [145].

Для измерения на станке отклонений обработанного контура использовалась модульная головка, представленная на рис. 5.20, а). Если вместо обработанной детали использовать образцовую деталь (artifact), то данная схема измерения и прибор - модульная головка, могут использоваться для измерения отклонений воспроизведения траектории на станке с ЧПУ. Такой подход был использован для исследования точности воспроизведения траектории на координатной измерительной машине мод. КА-50 с ЧПУ [38-39].

Следует отметить, что описанный способ и устройство приводятся как альтернатива прибору «ballbar» в ГОСТ 30544-97 «Методы проверки точности и постоянства отработки круговой траектории».

Однако модульные головки имеют недостаточную точность для оценки точности воспроизведения траектории современных станков класса точности П и выше. Так, модульная головка мод. Digitaler 3D – Taster ф. Haimer GmbH (Germany) имеет допустимую погрешность измерения – 0,005 мм [141] (рис. 5.20, б). В качестве прибора сравнения наряду с модульными головками могут применяться компонентные головки [46,87-89,159].

Нулевые головки в сочетании с образцовым шаром [159, 166, 167] применяются для оценки отклонений в статическом режиме работы станка. Эти значения могут использоваться как исходные данные для систем коррекции. Это направление получило дальнейшее развитие путём создания специальных образцовых деталей [193] и методик определения первичных отклонений многокоординатных станков с ЧПУ и КИМ.



а)



б)

Рис. 5.20. Модульные измерительные головки: а) измерительная головка (E.I.D.) размерности $2^{1/2}$ [145], б) измерительная головка Digitaler 3D – Taster [141]

5.2.2. Способ оценки объёмной точности станка, основанный на измерении «следа» действительной траектории на обработанной поверхности

Хорошей информативностью при высокой точности измерений отличается метод оценки «объёмной» точности станка, основанный на измерении «следа» на обработанной поверхности. Этот способ был развит в настоящей

работе при исследовании статических и динамических свойств станка параллельной структуры «Гексамех-1».

Обработанная поверхность есть «слепок» процессов, происходящих в системе «Станок-приспособление-инструмент-деталь». Относительные перемещения режущего инструмента и обрабатываемой детали непосредственно остаются на обработанной поверхности в виде «следа». Если эти перемещения имеют колебательный характер, то «след» называют «вибрационным» и по нему [23] делаются выводы о динамических свойствах несущей системы станка. Если образцы деталей будут сделаны из легко обрабатываемого материала (алюминиевые сплавы) и иметь жесткую конструкцию, а также жесткий хорошо заточенный режущий инструмент, то на обрабатываемую поверхность будут, в основном, переноситься относительные перемещения «шпиндель – рабочий стол» станка. В этом случае, по «следу» на обработанной поверхности можно оценивать отклонения действительной траектории движения ИО станка от номинальной (заданной).

Ниже на примере исследования «вибрационного следа», оставшегося на поверхности, обработанной на станке параллельной структуры мод. «Гексамех-1» [21, 97-101, 103, 114, 132, 188], показана степень информативности данного подхода к изучению динамических свойств несущей системы станка и, в частности, для измерения отклонений действительной траектории от расчётной.

При исследовании статических и динамических свойств НС станка «Гексамех-1» было выявлено, что у НС существует сравнительно низкая статическая поперечная жёсткость [22] и соответственно низкая поперечная динамическая жесткость [58-62], которая является причиной возникновения «вибрационного следа» на обрабатываемой поверхности.

Для проверки предположения, что при ступенчатом силовом воздействии только в одном направлении во время резания (во время движения платформы), например, вдоль координаты Y , возникают также колебания платформы в поперечном направлении, которые «переносятся» на обрабаты-

ваемую поверхность, была проведена обработка серии тестовых поверхностей с силовым «ступенчатым» воздействием на платформу Гауфа – Стюарта [21].

На рис. 5.21 изображены станок и тестовая деталь, готовые к натурным испытаниям.

На рис. 5.22, в качестве примера, показаны: 1) профилограмма обработанной поверхности при отсутствии «ступенчатой» инерционной нагрузки (подача $F = \text{Const}$) (рис. 5. 22, а), 2) профилограмма поверхности при наличии «ступенчатой» инерционной нагрузки (ступенчатое изменение подачи F) (рис. 5. 22, б).

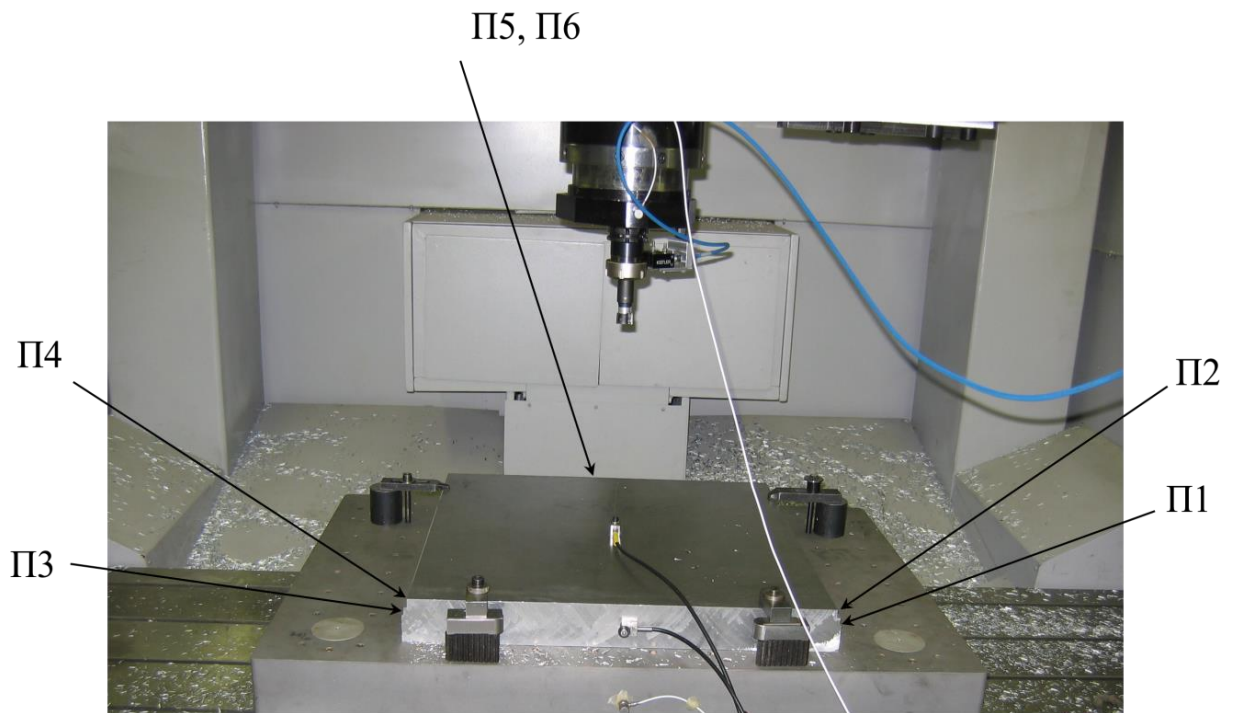


Рис. 5.21. Станок и тестовая деталь, готовые к натурным испытаниям: поверхности П1 и П2, П3 и П4 находятся в плоскости YOZ, поверхности П5 и П6 – в плоскости XOZ

Профилограммы получены измерением обработанной поверхности на контурографе мод. Mar Surf XC-10 (рис. 5.23). Основные характеристики прибора следующие [80]:

- Диапазон перемещения измерительной иглы по координате X: – 120мм.

- Диапазон перемещения по координате Z: 50 мм.
- Разрешающая способность (дискретность) (координата X): 1 мкм.
- Разрешающая способность (дискретность) (координата Z) приведенная к измерительной системе - индуктивному преобразователю: 0,04мкм.

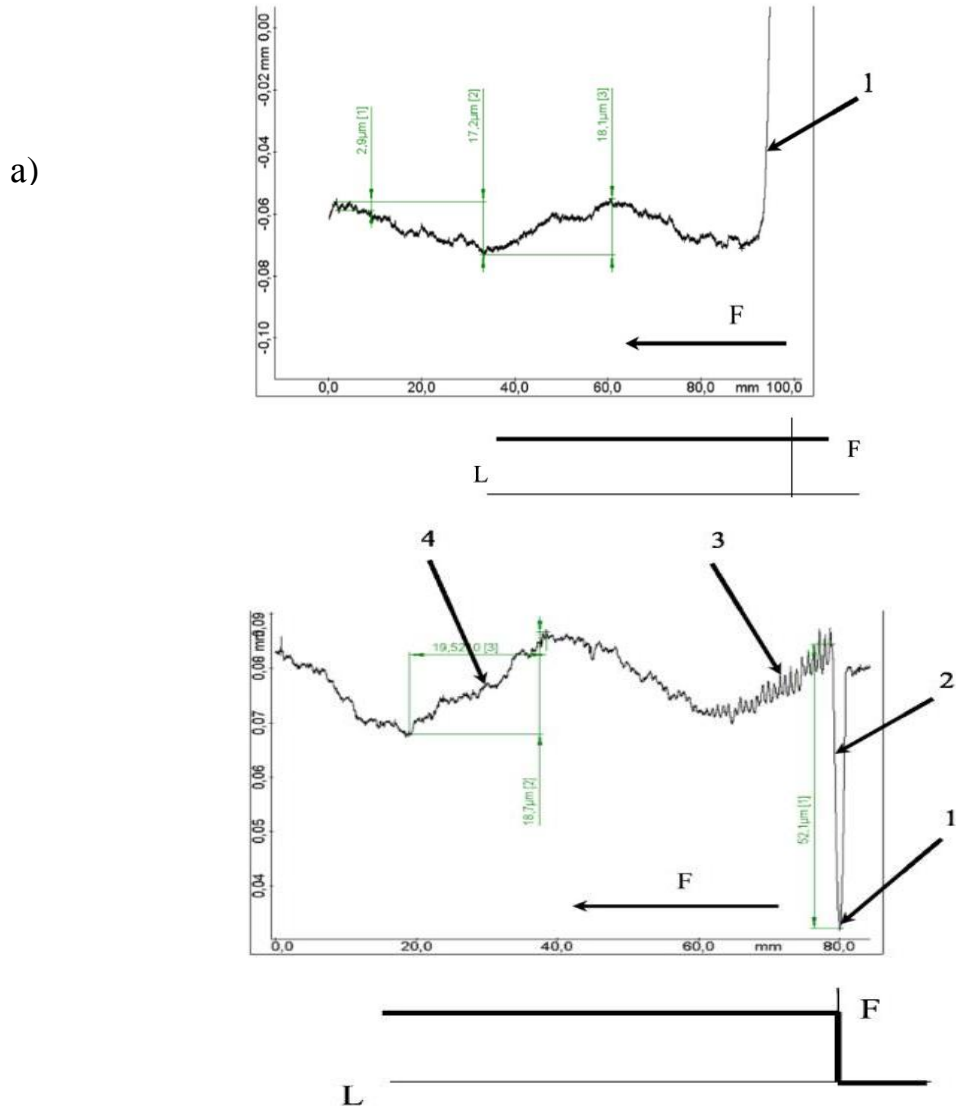


Рис. 5.22. Профилграмма поверхности, обработанной с подачей: а) $F = 540$ мм/мин и $S = 6000$ об./мин, при «плавном» врезании 1, F – направление подачи; б) $F = 720$ мм/мин и $S = 6000$ об./мин, при «ступенчатом» нарастании подачи: 1- выстой, 2- участок разгона, 3- участок свободных затухающих колебаний, 4 - участок с установившимся движением, F – направление подачи

- Допустимое отклонение направляющих (накопленное отклонение в направлении Z): менее 1 мкм.
- Измерительное усилие: 2mN-120mN (устанавливаемое).

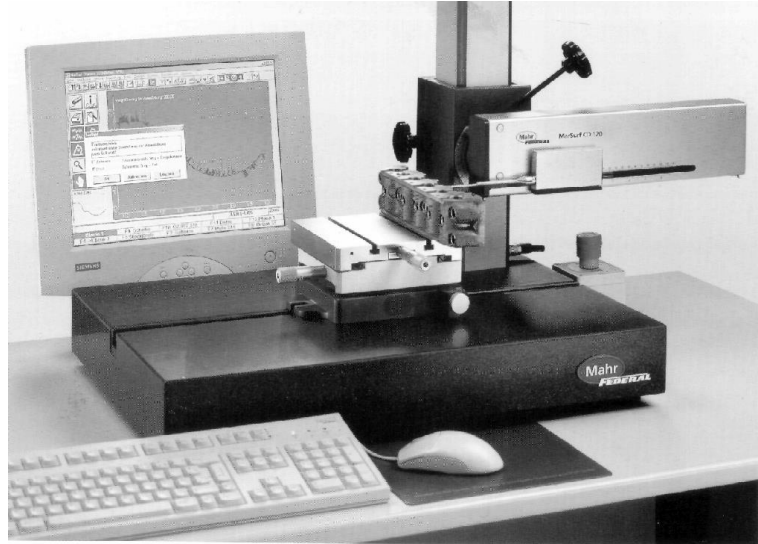


Рис. 5.23. Контурограф мод. Mar Surf XC-10

Исследуя профилограммы (рис. 5.23), можно определить отклонения действительной траектории от номинальной с допускаемым отклонением ≤ 1 мкм.

В нашем случае четко видны:

1. Волнообразное отклонение от прямолинейности с амплитудой 17-18 мкм и шагом ≈ 40 мм .
2. Величина «зареза» (статические деформации в системе СПИД — разница между участком поверхности, где инструмент «стоит» и участком, где осуществляется движение инструмента) — 52 мкм
3. Затухающие (свободные) колебания платформы Гауфа — Стюарта с частотой 15 - 17 Гц и начальной амплитудой ≈ 8 мкм.

Таким образом, измерение обработанной поверхности является хорошим инструментом для определения отклонений действительной траектории движения инструмента от номинальной.

Для целенаправленного исследования влияния динамики приводов на действительную траекторию движения исполнительных органов станка в ра-

боте [3] предлагается среди всего разнообразия траекторий центра фрезы выделить несколько типовых, определяющих динамическую точность систем:

- переход с прямого участка на дугу окружности;
- переход с дуги окружности на прямолинейный участок;
- переход с дуги окружности с внешним радиусом закругления на дугу окружности с внутренним радиусом закругления и наоборот;
- переход с одной дуги окружности с внешним радиусом закругления на другую, также с внешним радиусом закругления;
- изменение направления движения под прямым углом;
- изменение направления движения под острым углом;
- изменение направления движения под тупым углом.

Контурная скорость при обходе типовой траектории сохраняется постоянной.

След на обработанной поверхности при указанных типовых траекториях легко может быть измерен на контурографе мод. Mar Surf XC-10 с учетом ограничений по габаритам образца-изделия и рабочего поля прибора 50 x 120 мм.

5.3. Выводы по главе

1. Существует большое разнообразие методов и средств оценки объёмной точности многокоординатных машин с ЧПУ.

2. Предложена классификация методов и средств оценки объёмной точности многокоординатных машин с ЧПУ, позволяющая систематизировать средства измерения объёмной точности, выявить их преимущества и недостатки, определить пути их дальнейшего совершенствования.

3. Наиболее развиты и широко применяются в промышленности методы и средства измерения отклонений траектории, расположенной в плоскости (приборы ballbar и Grid Encoders KGM).

4. Наблюдается создание широким фронтом приборов для измерения отклонений траектории в пространстве.

5. Способ измерения отклонений траектории в пространстве, основанный на использовании прибора Tracer (L_1C_2), нашел применение в станкостроении для аэрокосмической промышленности и тяжелого машиностроения.

6. Способ измерения отклонений траектории, основанный на измерении «следа» на обработанной поверхности, является простым и универсальным. Этот способ информативен, но отличается повышенной трудоёмкостью.

ГЛАВА VI. ВЛИЯНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ (ВЕСА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДВИЖНЫХ УЗЛОВ) НА ТОЧНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ИО МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ

Предыдущие главы были посвящены вопросам анализа и синтеза точности траектории движения ИС многокоординатной машины с позиций геометрической точности несущей системы машины (отклонения изготовления и сборки деталей и узлов машины).

На точность траектории движения ИС многокоординатной машины с ЧПУ наряду с отклонениями геометрической точности несущей системы машины оказывают существенное влияние ещё два фактора (рис. 1.2): силовые и температурные деформации.

Ниже рассмотрены вопросы анализа и синтеза точности траектории движения ИС многокоординатной машины с позиций учёта веса и температуры узлов.

6.1. Этапы создания многокоординатной машины и виды экспериментальных исследований статических и динамических свойств её несущей системы

На рис. 6.1 представлены состояния машины и виды экспериментальных исследований, позволяющих выявить связи первичных и интегральных отклонений со свойствами машины и возмущениями, действующими на неё.

Машина создается по техническому заданию, разрабатываемому, исходя из функционального назначения машины.

В процессе конструирования создается проект на её изготовление и эксплуатацию. Конструктор всегда стремится создать *«идеальную» машину* (состояние (1)), у которой, независимо от действующих на неё возмущений ($G_i, F_i, \Theta_i, i = 1 \dots n$, рис. 1.2), первичные отклонения механизмов q_i и интегральные отклонения исполнительных органов $\overline{\delta}_\Sigma$ находятся в норме.

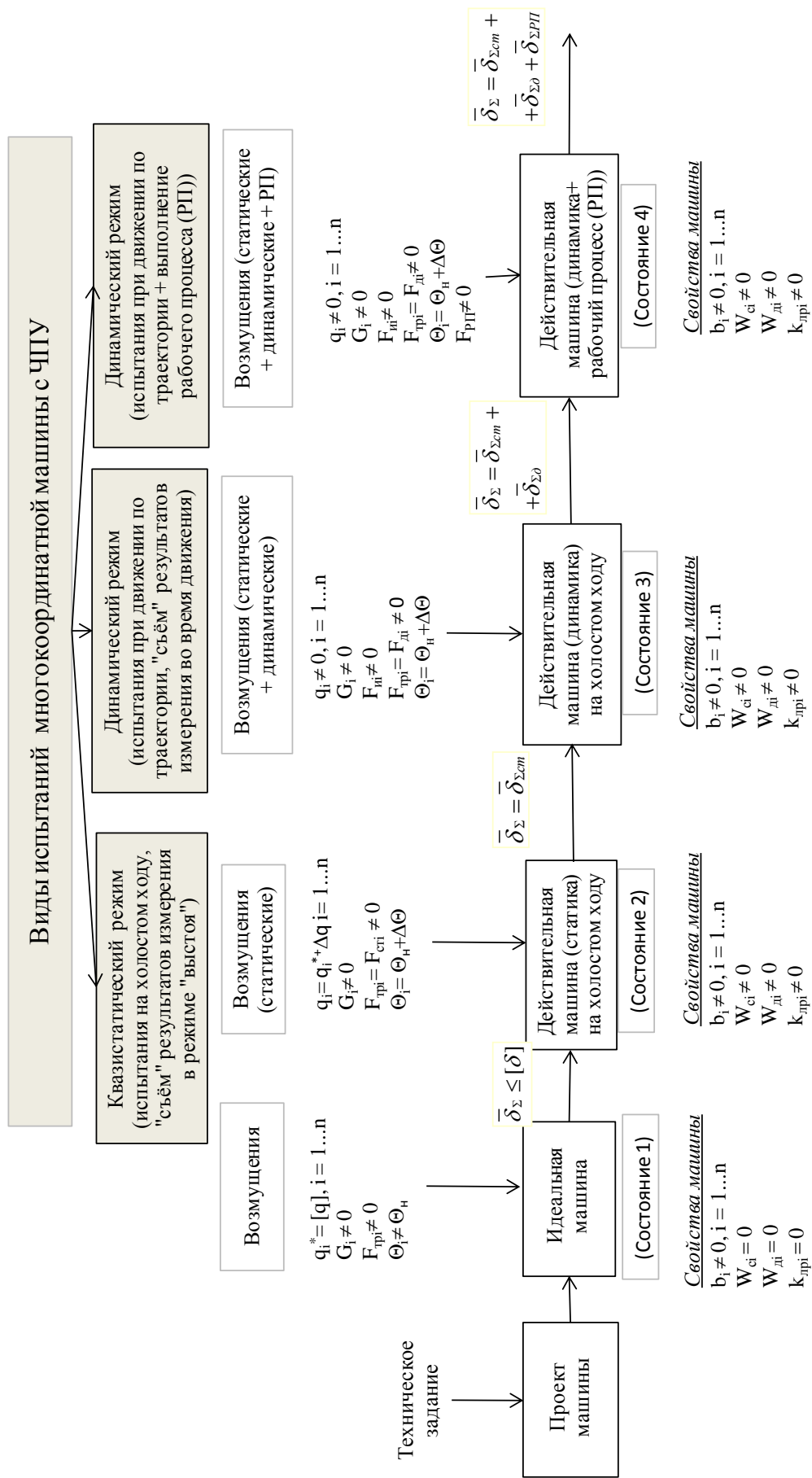


Рис. 6.1. Этапы создания машины и виды исследований первичных и интегральных отклонений

Состояние (1) – это идеальная машина, обладающая идеальными свойствами ($b_i \neq 0$, $W_{cti} = 0$, $W_{ди} = 0$, $k_{лр} = 0$) при действии квазистатических возмущений ($q_i^* = [q]$, $i = 1...n$, $G_i \neq 0$, $F_{тpi} = F_{cti} \neq 0$, $\Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta$), имеет на выходе нормированное отклонение $\overline{\delta_\Sigma} \leq [\delta]$.

Состояние (2) – это действительная машина, находящаяся в квазистатическом режиме, т.е. когда все подвижные узлы находятся в покое (выстой) или движение подвижного узла прямолинейное и равномерное (ГОСТ 22267-76). От предыдущего это состояние отличается тем, что звенья механизмов обладают податливостью и имеют ненулевой температурный коэффициент линейного расширения ($W_{cti} \neq 0$, $W_{ди} \neq 0$, $k_{лр} \neq 0$). При этом первичные отклонения механизмов машины q_i будут отличаться от q_i^*

$$q_i = q_i^* + \Delta q_i,$$

где Δq_i – дополнительные изменения первичных отклонений, вызванных силовыми и температурными деформациями звеньев и узлов машины.

В этом состоянии производится испытание машины на «холостом ходу» с целью измерения и контроля параметров геометрической точности машины в состоянии покоя ("съём" результатов измерения в режиме "выстоя" и без выполнения рабочего процесса). Машина с действительными свойствами ($q_i = q_i^* + \Delta q_i$, $b_i \neq 0$, $W_{cti} \neq 0$, $W_{ди} \neq 0$, $k_{лр} \neq 0$) при действии квазистатических возмущений ($q_i = q_i^* + \Delta q_i$, $G_i \neq 0$, $F_{тpi} = F_{cti} \neq 0$, $\Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta$, $i = 1...n$) имеет на выходе не нулевое отклонение $\overline{\delta_\Sigma} = \overline{\delta_{\Sigma ct}}$.

Состояние (3) - это действительная машина в состоянии движения при отработке заданной траектории без совершения рабочего процесса (ГОСТ 30544-97). При этих испытаниях возникают дополнительные силы (силы инерции $F_{иi}$, силы трения движения $F_{ди}$) происходит выделение тепла и меняется температура деталей и узлов машины $\Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta_i$ и др. Машина с действительными свойствами ($q_i = q_i^* + \Delta q_i$, $b_i \neq 0$, $W_{cti} \neq 0$, $W_{ди} \neq 0$, $k_{лр} \neq 0$, $i = 1...n$) при действии квазистатических и динамических возмущений ($q_i \neq 0$, $i =$

$1...n, G_i \neq 0, F_{ii} \neq 0, F_{tri} = F_{di} \neq 0, \Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta$) имеет на выходе отклонение $\overline{\delta_\Sigma} = \overline{\delta_{\Sigma ст}} + \overline{\delta_{\Sigma д}}$.

Увеличение отклонений исполнительных органов машины с ЧПУ за счёт динамических нагрузок и за счёт изменения температурных полей $\overline{\delta_{\Sigma д}}$, может достигать 30% и более в зависимости от типа машины (станка) (для шлифовальных станков $\overline{\delta_{\Sigma д}}$, может достигать 70%) [136, 178, 170].

Средства измерения отклонений $\overline{\delta_\Sigma}$ исполнительных органов машины с ЧПУ при движении по траектории рассмотрены в главе V, а средства измерения первичных отклонений q_i в статическом режиме рассмотрены в главе IV. Зная первичные отклонения q_i механизмов, можно, используя имитационную модель образования отклонения исполнительных органов многокоординатной машины (глава IV), получить отклонение $\overline{\delta_{\Sigma ст}}$. Сравнивая отклонения $\overline{\delta_{\Sigma ст}}$ и $\overline{\delta_\Sigma}$, можно оценить увеличение отклонений исполнительных органов машины с ЧПУ за счёт динамических нагрузок и изменения температурных полей станка $\overline{\delta_{\Sigma д}}$ и сделать выводы о динамических свойствах станка при отработке траектории.

Другой путь – сравнение результатов измерения образцовых деталей (artifacts) в динамическом и квазистатическом режиме.

Состояние (4) - это *действительная машина в состоянии движения* при отработке заданной траектории при выполнении рабочего процесса (ГОСТ 25443-82 ОБРАЗЦЫ – ИЗДЕЛИЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ). Машина с действительными свойствами ($q_i \neq 0, b_i \neq 0, W_{cti} \neq 0, W_{di} \neq 0, k_{пр} \neq 0$) при действии квазистатических, динамических возмущений и возмущений рабочего процесса ($q_i \neq 0, i = 1...n, G_i \neq 0, F_{ii} \neq 0, F_{tri} = F_{di} \neq 0, \Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta, F_{рп} \neq 0$) имеет на выходе не нулевое отклонение $\overline{\delta_\Sigma} = \overline{\delta_{\Sigma ст}} + \overline{\delta_{\Sigma д}} + \overline{\delta_{\Sigma рп}} \neq 0$. Три вида испытаний и результаты моделирования в соответствии с имитационной моделью (Глава III) являются мощным сред-

ством выявления резервов повышения точности многокоординатных машин с ЧПУ.

6.2. Квазистатический режим испытаний геометрической точности многокоординатной машины с ЧПУ (состояние 2)

В этом состоянии производятся испытания машины на «холостом ходу» с целью контроля параметров геометрической точности машины в состоянии покоя ("съём" результатов измерения в режиме "выстоя" и без выполнения рабочего процесса) или движения подвижного узла (прямолинейное и равномерное (ГОСТ 22267-76)). Машина с действительными свойствами ($q_i = q_i^* + \Delta q_i$, $b_i \neq 0$, $W_{cti} \neq 0$, $W_{ди} \neq 0$, $k_{лр} \neq 0$, $i = 1...n$) при действии квазистатических возмущений ($q_i = q_i^* + \Delta q_i$, $G_i \neq 0$, $F_{тpi} = F_{cti} \neq 0$, $\Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta$, $i = 1...n$) имеет на выходе отклонение $\overline{\delta_\Sigma} = \overline{\delta_{\Sigma ст}}$.

При этом первичные отклонения механизмов машины q_i будут отличаться от q_i^*

$$q_i = q_i^* + \Delta q_i,$$

где Δq_i – дополнительные изменения первичных отклонений, вызванных силовыми и температурными деформациями звеньев и узлов машины.

При этих испытаниях измеряются все первичные отклонения многокоординатной машины, сравниваются с нормами точности и делается вывод о необходимости внесения коррекции (файлов коррекции) в систему ЧПУ или проведения диагностики (ГЛАВА VII) возникновения существенных отклонений от нормы.

В настоящее время наиболее развиты исследования точности позиционирования исполнительных органов машины (ГОСТ 27843-2006 «Станки металлорежущие. Методы проверки точности позиционирования» и ISO-230-2 1997). Они, как правило, проводятся на современном оборудовании и протоколируются. Аналогичным образом должны проводиться исследования точности также остальных первичных отклонений.

На этой стадии (анализа) исследований самым важным является определение случайной составляющей, т. к. воздействие на неё возможно только через конструкцию машины, технологию изготовления и, в частности, технологию сборки, либо применением других видов коррекции (ГЛАВА I).

По данным диссертанта, для отклонений позиционирования функциональная составляющая по отношению к случайной до проведения коррекции может составлять до 10/1. Введение коррекции изменяет это соотношение до 1/1. Такое соотношение, как правило, приводится в технических условиях на изготовление современных многокоординатных многоцелевых станков с ЧПУ.

Ниже рассмотрим, как влияют силовые и температурные деформации на первичные отклонения $q_i = q_i^* + \Delta q_i$, где Δq_i – дополнительные изменения первичных отклонений, вызванные силовыми и температурными деформациями звеньев и узлов машины.

6.2.1. Влияние статической жесткости узлов машины на первичные отклонения механизмов

6.2.1.1. Изменение точности позиционирования станка «Гексамех-1» при изменении жесткости его несущей системы

В результате экспериментальных исследований несущей системы станка «Гексамех -1» [21] было выявлено, что его статическая жесткость является недостаточной (4,6÷15,5 Н/мкм).

Анализ поузловой жесткости несущей системы, результаты которого частично представлены в [22], показал, что слабым элементом конструкции является крепление кронштейнов верхних шарниров платформы Гауфа - Стюарта к раме станка (рис. 6.2).

Были проведены исследования точности позиционирования по линейной координате Y станка «Гексамех-1» до и после повышения статической жесткости [110].

В результате исследований было выявлено, что увеличение статической жесткости в направлении Y приводит к существенному уменьшению отклонения обратного хода.

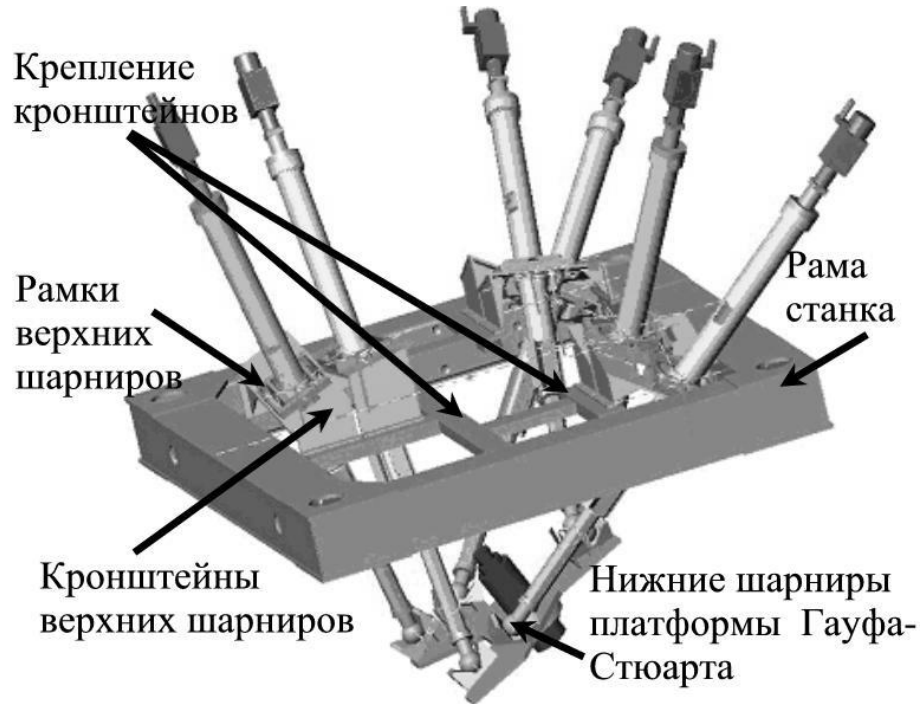


Рис. 6.2. Схема платформы Гауфа - Стюарта

Результаты измерения линейной статической жесткости J до и после усиления конструкции НС представлены в табл. 6.1 (1-я буква в индексе жесткости J_{lx} указывает на направление действия силы X , а 2-я на направление измеряемого перемещения Y).

Табл. 6.1

Результаты измерения статической жесткости до/после усиления конструкции

	Линейная жесткость J НС станка, Н/мкм		
Сила $F+x$	$J_{xx} = 4,6/5,6$	$J_{xy} = 55/77,0$	$J_{xz} = 35,0/26,3$
Сила $F+y$	$J_{yx} = 50,0/66,7$	$J_{yy} = 4,8/8,6$	$J_{yz} = 200,0/\rightarrow\infty$
Сила $F+z$	$J_{zx} = 30,0/25$	$J_{zy} = 175,0/\rightarrow\infty$	$J_{zz} = 15,5/16,7$
Сила $F-x$	$J_{xx} = 4,8/5,8$	$J_{xy} = 120/77,0$	$J_{xz} = 30,0/25,3$

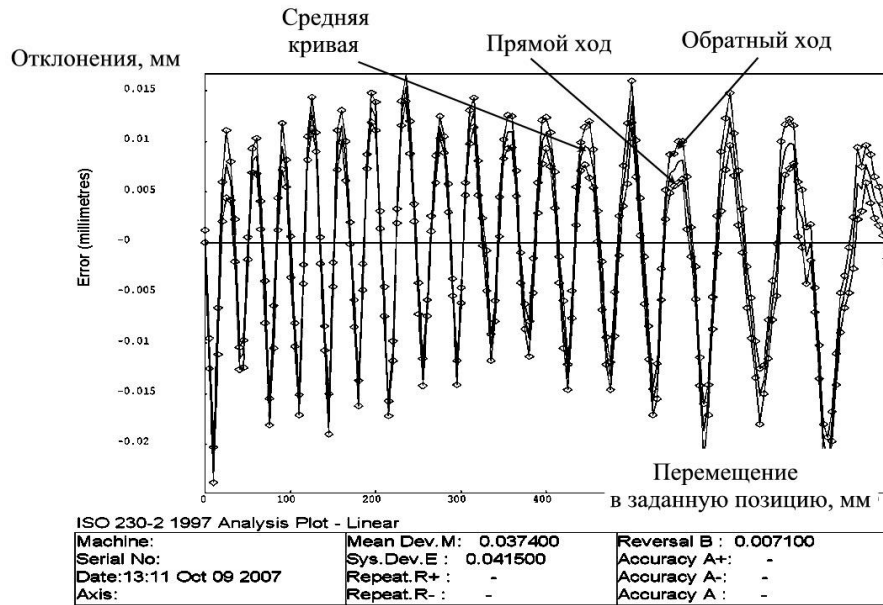


Рис. 6.3. Кривые точности позиционирования после повышения жесткости

В результате проведенных работ жесткость увеличилась почти в 2 раза по координате Y (4,8 → 8,6 Н/мкм) и не существенно по координатам X (4,6 → 5,6 Н/мкм) и Z (15,5 → 16,7 Н/мкм).

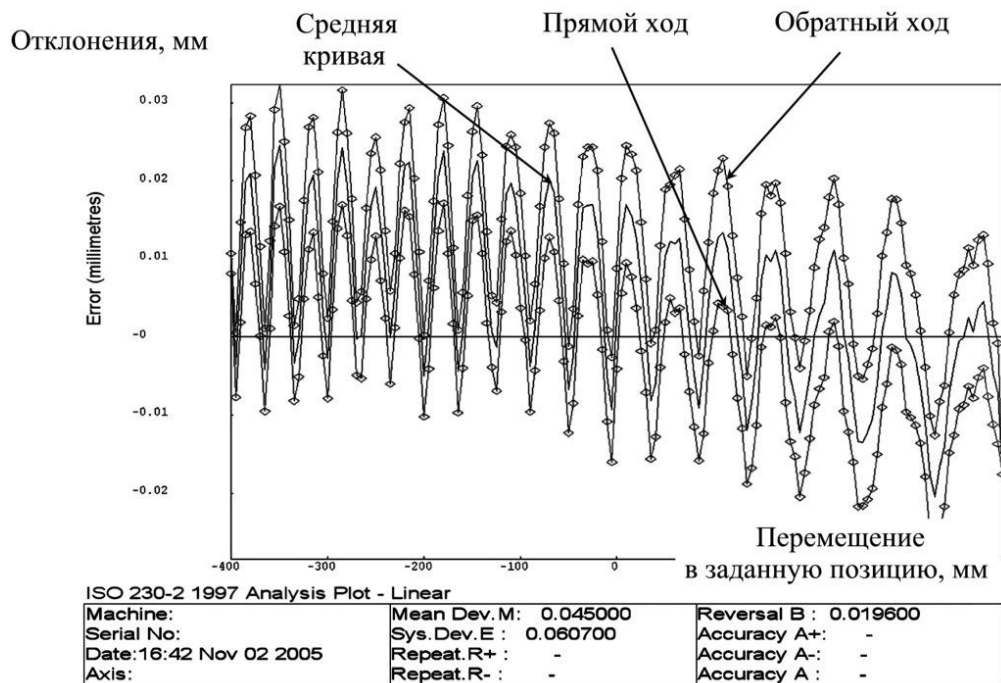


Рис. 6.4. Кривые точности позиционирования до повышения жесткости НС

В результате повышения жесткости конструкции отклонение обратного хода уменьшилось с 20мкм до 7мкм.

Это можно объяснить тем, что при увеличении жесткости конструкции в направлении оси Y уменьшается отклонение EAY (поворот платформы вокруг оси X («упругий» зазор)) при смене направления движения по Y .

6.2.1.2. Связь «отклонений от прямолинейности в пл. YZ » при движении стойки по координате Y с деформациями каретки при перемещении стойки для станка мод. МС 300

Априори можно утверждать, что упругие деформации деталей и узлов машины (станка), возникающие от перемещения подвижных узлов станка, вызывают изменения во всех первичных отклонениях q_i механизмов машины [17-19]. Задача разделения q_i на q_i^* и Δq_i и их анализ является важной. Однако прямыми измерениями решается лишь в некоторых частных случаях, как например, при влиянии перемещения стойки вдоль каретки на деформации последней и соответственно на отклонения от прямолинейности движения.

На рис. 6.5, представлена конструкция станка мод. МС - 300, в которой применены салазки консольного типа.

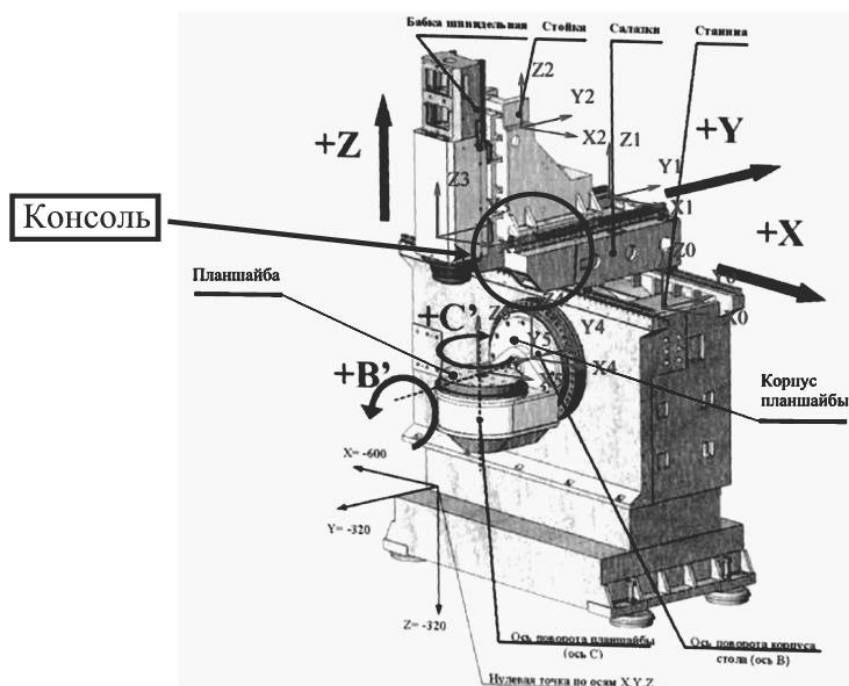


Рис. 6.5. Конструкция станка мод. МС – 300 с салазками консольного типа

На рис. 6.6 показаны измерительные средства, с помощью которых измеряются отклонения от перпендикулярности движения стойки в пл. YZ относительно присоединительной поверхности поворотного стола.

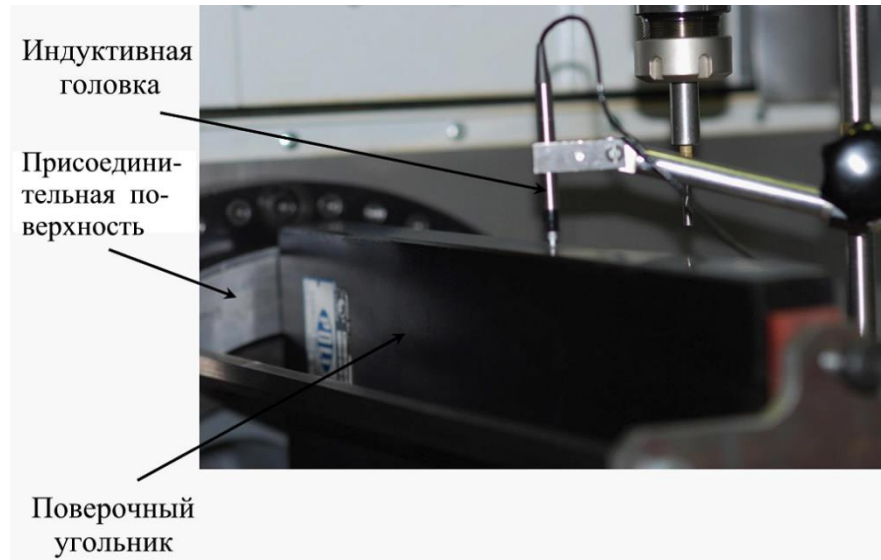


Рис. 6.6. Общий вид средств измерения отклонения от перпендикулярности движения стойки в пл. YZ

На рис. 6.7 представлены результаты измерения отклонения от перпендикулярности движения стойки в пл. YZ.

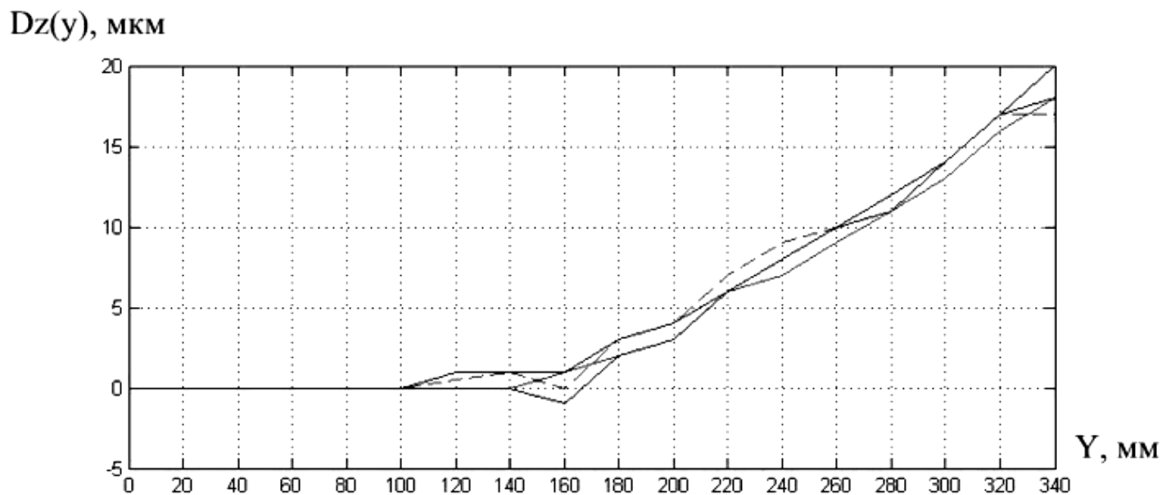


Рис. 6.7. Отклонение $Dz(y)$ корпуса шпиндельной бабки от поверхности поверочного угольника, забазированного относительно присоединительной поверхности «поворотный стол – корпус планшайбы»

Кривая отклонений $Dz(y)$ по виду близка к кривой прогиба консоли (с обратным знаком).

Для проверки предположения, что причиной возникновения измеренных отклонений $Dz(y)$ являются деформации салазок, а именно, их консоли, были измерены перемещения салазок в трёх точках А, В, С при движении стойки в диапазоне 0 - 340 мм.

На рис. 6.8 представлена схема измерения деформаций салазок в точке В с максимальным вылетом, в точке А с минимальным вылетом и в точке С (контрольная точка) в противоположной стороне от консоли.

Как показали измерения при перемещении стойки из нулевого (крайнее правое положение) на 340 мм влево точка В опускается на 11 мкм, точка А на 3 мкм, а точка С практически не смещается < 1 мкм.

Деформации консоли салазок сложным образом переносятся на перемещения корпуса шпинделя, расположенного на стойке.

Однако следует отметить, что отклонения перемещения корпуса шпинделя $Dz(y)$ относительно поверхности поверочного угольника при движении стойки по координате Y имеют устойчивый характер и величина разброса отклонений не превышает 3 мкм, что показали многочисленные измерения этого параметра для всех 6 собранных экземпляров станков мод. МС — 300.

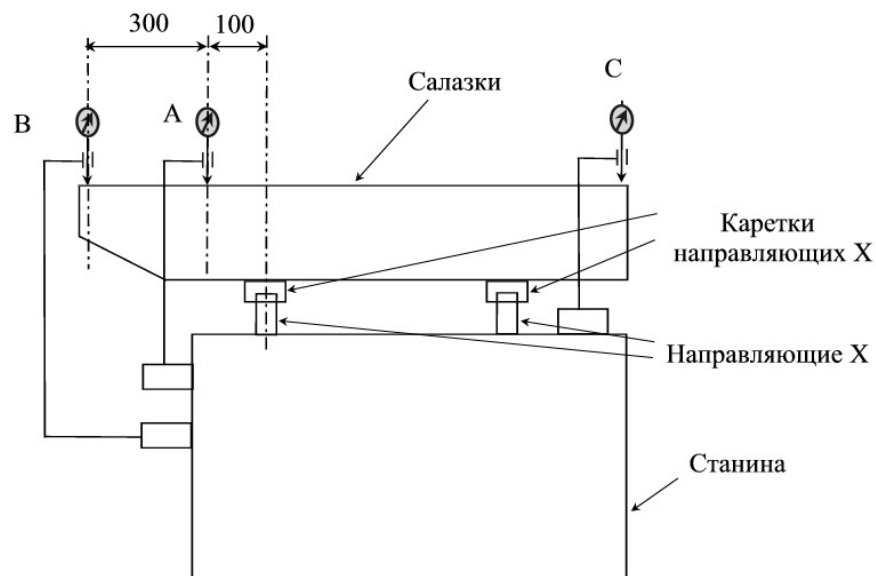


Рис. 6.8. Схема расположения точек измерения перемещений (деформаций) салазок при движении стойки вдоль координаты Y

Поэтому эти отклонения поддаются компенсации как составляющие отклонения от параллельности движения стойки относительно зеркала планшайбы.

Значительно более сложной является картина влияния перераспределения веса на отклонения от перпендикулярности в пл. YZ и XZ (Δq_i) при перемещении шпиндельной бабки вдоль оси Z . Ниже приводятся результаты измерения отклонений от перпендикулярности в пл. YZ и XZ при перемещении шпиндельной бабки вдоль оси Z и их анализ.

6.2.1.3. Исследование отклонений от перпендикулярности движения шпиндельной бабки в пл. YZ

На рис. 6.9 представлена схема измерения отклонений EYZ ($Dy(z)$) при движении шпиндельной бабки (5), установленной на стойке (1).

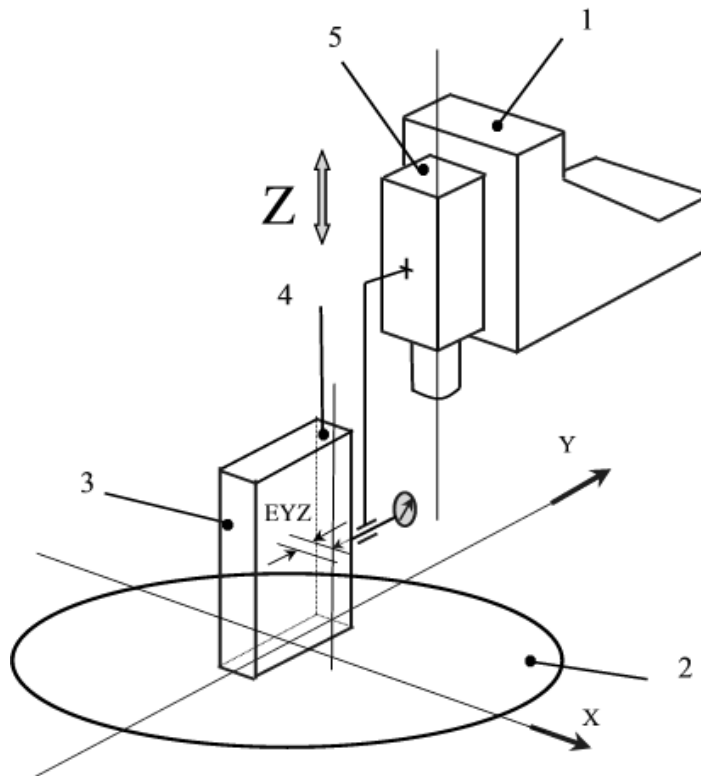
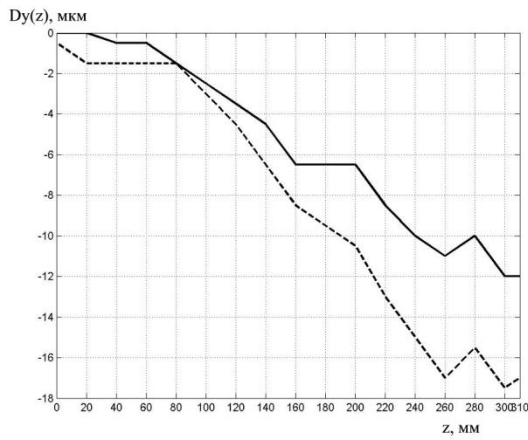


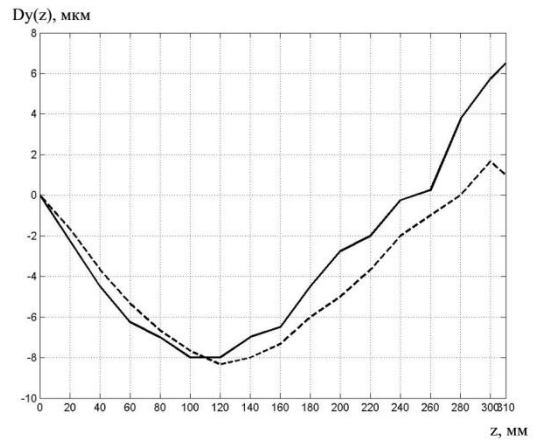
Рис. 6.9. Схема измерения отклонений EYZ ($Dy(z)$)

Отклонения EYZ ($Dy(z)$) измеряются относительно поверхности поворочного рамного угольника (3 - передняя рабочая грань угольника, 4 - задняя рабочая грань), установленного на зеркале планшайбы поворотного стола (2).

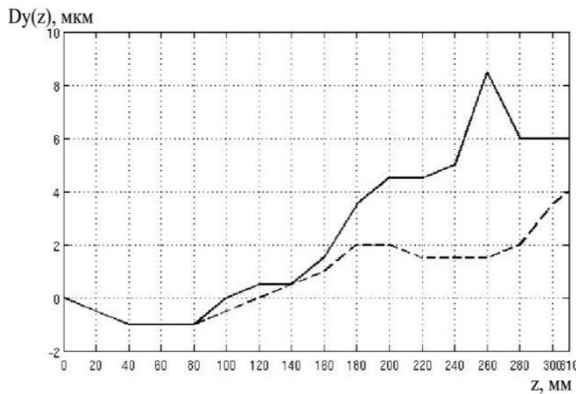
На рис. 6.10 представлены результаты измерений отклонения EYZ ($Dy(z)$) при положении каретки X (-135мм, -145мм) для 4 станков.



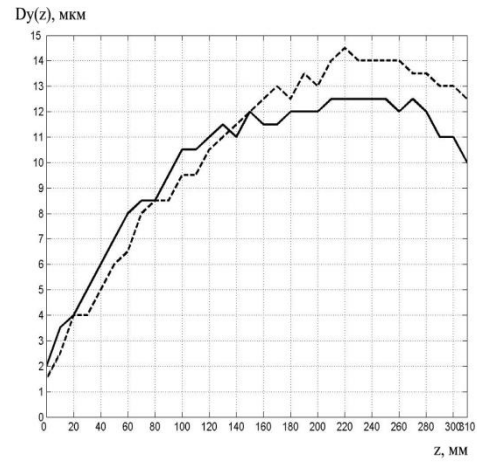
а)



б)



в)



г)

Рис. 6.10. Отклонения $Dy(z)$ от перпендикулярности движения шпиндельной бабки по направляющим стойки (координата Z) относительно поверхности планшайбы при постоянном положении салазок (координата $X = Const$)

Здесь:

а) станок № 1 (сплошная кривая: $x = -135$ мм, $y = -14$ мм, измерение по задней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе, пунктирная кривая: $x = -145$ мм, $y = -103$ мм, измерение по передней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе),

б) станок № 2 (сплошная кривая: $x = -135$ мм, $y = -52$ мм, измерение по задней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе, пунктирная кривая: $x = -145$ мм, $y = -155$ мм (измерение по передней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе),

в) станок № 3 (сплошная кривая: $x = -135$ мм, $y = -20$ мм, измерение по задней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе), пунктирная кривая: $x = -135$ мм, $y = -120$ мм (измерение по передней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе)

г) станок № 4 станок № 3 (сплошная кривая: $x = -135$ мм, $y = -52$ мм, измерение по задней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе), пунктирная кривая: $x = -135$ мм, $y = -155$ мм (измерение по передней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе).

При измерении отклонений перпендикулярности движения шпиндельной бабки по направляющим стойки относительно поверхности планшайбы по схеме измерений, представленной на рис. 6.9, было замечено следующее. При измерении по «передней» грани поверочного угольника ($y \approx -110$ мм) и при измерении по задней грани поверочного угольника результаты $Dy(z)$ (рис. 6.10) для 4 станков отличаются не более 8 мкм (разница между сплошными и пунктирными кривыми). Однако при переходе от одного станка к другому характер кривой и значения измерений $Dy(z)$ отличаются значительно.

Кривые, представленные на рис. 6.10, свидетельствуют об относительной стабильности (отклонения 8 мкм) перемещений (деформаций) нижнего конца шпиндельной бабки при её перемещении вдоль оси Z при разных положениях стойки ($y = -50$ мм...-120 мм) и при одинаковом положении салазок (координата $X \sim \text{Const}$).

Однако величина $Dy(z)$ сильно зависит от координаты X , что хорошо видно из рис. 6.11, например, для станка № 3. Здесь:

а) сплошная кривая: $x = -135$ мм, $y = -20$ мм, измерение по задней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе), пунктирная кривая: $x = -135$ мм, $y = -120$ мм (измерение по передней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе),

б) сплошная кривая: $x = -335$ мм, $y = -20$ мм, измерение по задней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе), пунктирная кривая: $x = -335$ мм, $y = -120$ мм (измерение по передней грани рамного угольника, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе).

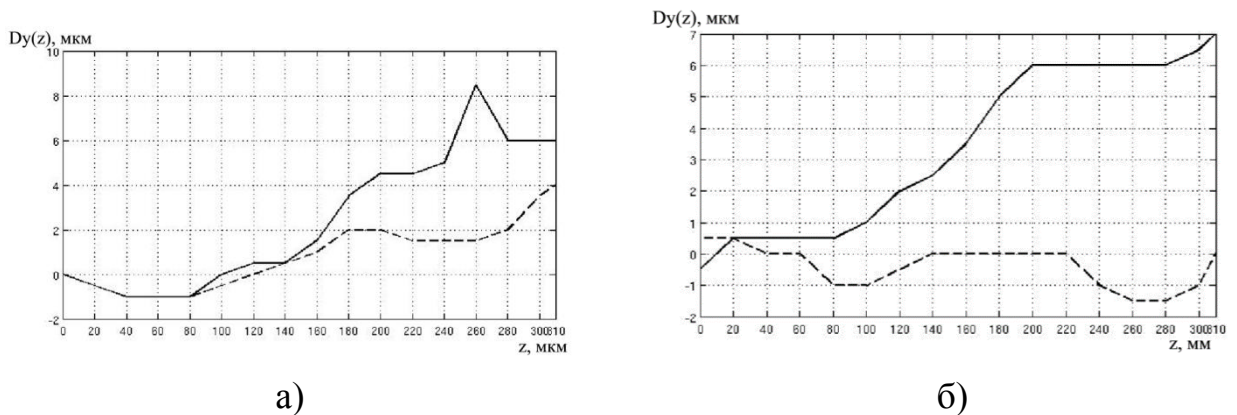


Рис. 6.11. Отклонения $Dy(z)$ от перпендикулярности движения шпиндельной бабки при различном положении салазок (координата X — Var) для станка № 3

Коррекция на величину $Dy(z)$ вводится по средней кривой (между сплошной и пунктирной) и по нескольким положениям салазок. Для каждого станка кривая $Dy(z)$ имеет свой вид.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что $Dy(z)$ зависит от координаты Y (влияние деформаций консоли салазок) и от координаты X (влияние поворота вокруг оси X стойки с салазками относительно станины при перемещении их вдоль оси X).

6.2.1.4. Исследование отклонений от перпендикулярности движения шпиндельной бабки в пл. XZ

На рис. 6.12 представлена схема измерения отклонений EXZ ($Dx(z)$) при движении шпиндельной бабки (5), установленной на стойке (1). Отклонения EXZ ($Dx(z)$) измеряются относительно поверхности поверочного рамного угольника (3 - правая рабочая грань угольника, 4 - левая рабочая грань), установленного на зеркале планшайбы поворотного стола (2).

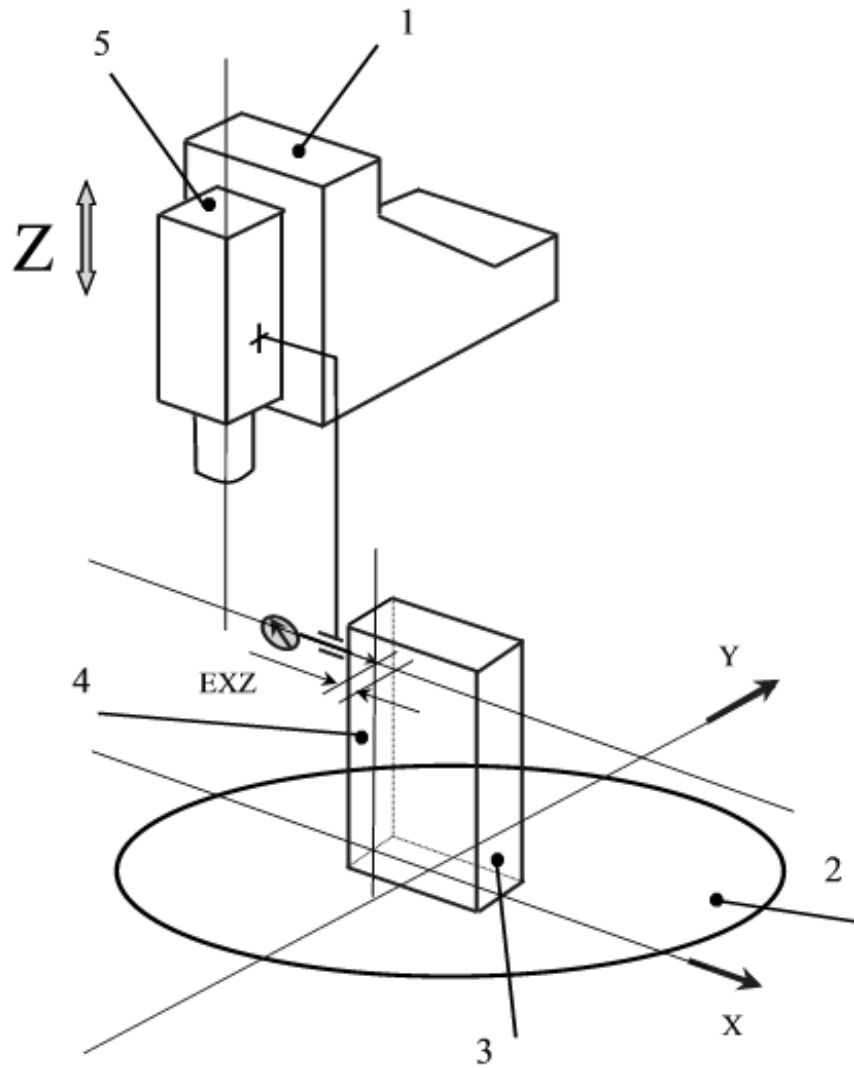


Рис. 6.12. Схема измерения отклонений EXZ ($Dx(z)$)

На рис. 6.13 представлены результаты измерения отклонений перпендикулярности движения шпиндельной бабки относительно поверхности планшайбы в пл. XZ.

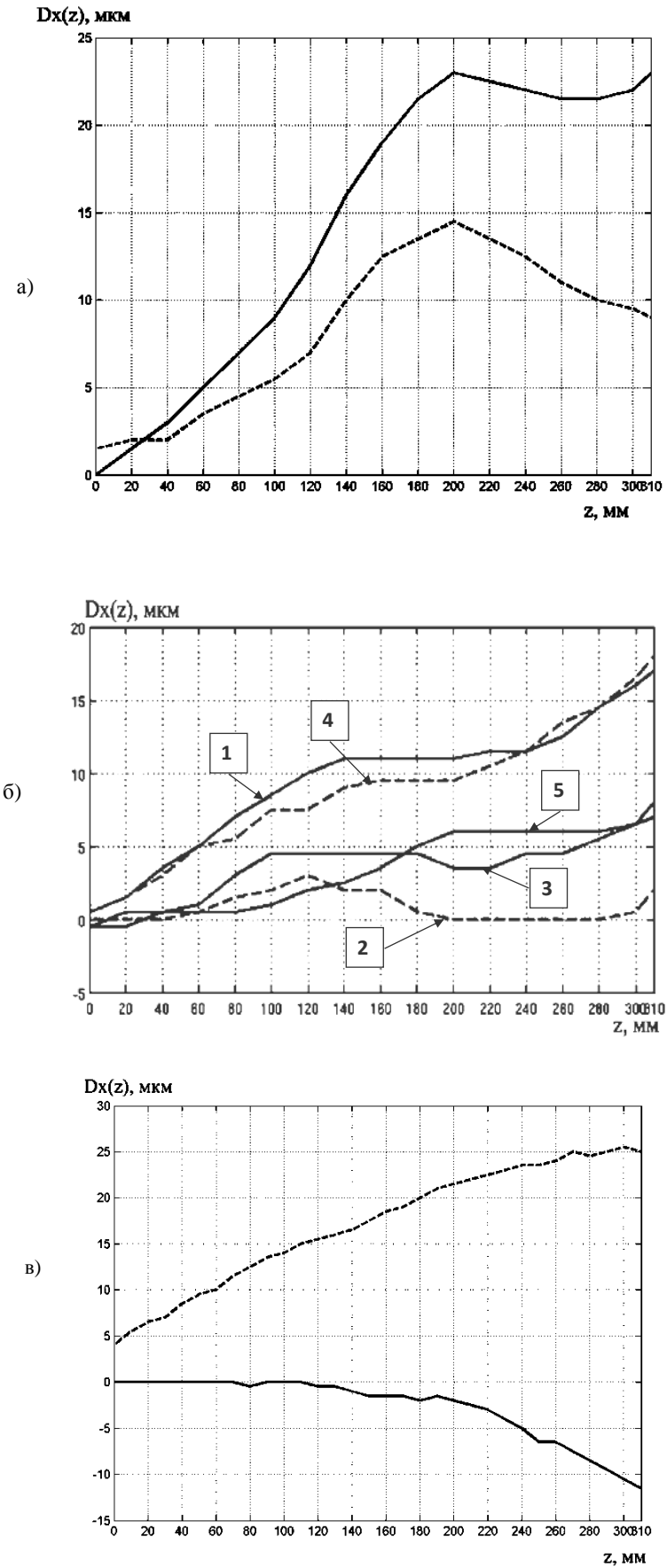


Рис. 6.13. Отклонения $Dx(z)$ от перпендикулярности движения шпиндельной бабки при различном положении салазок (координата $X = Var$)

Здесь:

а) станок № 1 (сплошная кривая: измерение по левой грани угольника $x = -400$ мм, $y = -100$ мм, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе, пунктирная синяя кривая: измерение по правой грани угольника $x = -40$ мм, $y = -100$ мм, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе),

б) станок № 3 (кривая 1: измерение по левой грани угольника $x = -400$ мм, $y = -100$ мм, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе, кривая 2: измерение по правой грани угольника $x = -40$ мм, $y = -100$ мм, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе, кривая 3: измерение по правой грани угольника $x = -240$ мм, $y = -180$ мм, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе, кривая 4: измерение по левой грани угольника $x = -240$ мм, $y = -180$ мм, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе, кривая 5: измерение по правой грани угольника $x = -400$ мм, $y = -100$ мм, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе,

в) станок № 4 (сплошная кривая: измерение по левой грани угольника $x = -400$ мм, $y = -100$ мм, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе, пунктирная синяя кривая: измерение по правой грани угольника $x = -40$ мм, $y = -100$ мм, среднее значение измерений при прямом и обратном ходе).

Коррекция на величину $Dx(z)$ вводится по средней кривой (между сплошной и пунктирной) для нескольких положений салазок. Экспериментальные исследования показали что $Dx(z)$ зависит от координаты X (влияние поворота вокруг оси Y стойки с салазками относительно станины при перемещении их вдоль оси X).

6.2.1.5. Выводы по результатам исследования влияния веса подвижных узлов на отклонения от прямолинейности и перпендикулярности движения

1) Деформации $Dz(y)$ для данной конструкции несущей системы сравнительно большие (> 10 мкм), повторяемость их хорошая. Они являются функцией одной переменной Y и не зависят от положения салазок по X и

шпиндельной бабки по координате Z . Они хорошо компенсируются (\approx до 85%) системой коррекции ЧПУ Sinumerik 840 D как отклонение параллельности движения корпуса шпинделя относительно зеркала планшайбы.

2) Деформации $Dy(z)$ для данной конструкции несущей системы сравнительно большие (> 10 мкм). Влияние $Dy(z)$ на отклонения от перпендикулярности движения шпинделя зеркалу планшайбы может быть уменьшено путем введения коррекции в систему ЧПУ (\approx до 50%) (усреднённая кривая по всему рабочему объёму). Величина Dy в данном случае должна рассматриваться как функция трех переменных $Dy(x, y, z)$. Существующие системы ЧПУ позволяют вводить корректирующую поправку в функции не более 2 (коррекция отклонений от плоскостности движения по двум линейным координатам). В рассматриваемом случае повышение точности возможно путём сочетания конструктивных мероприятий (применение разгруженной и симметричной конструкции [130, 181] привода шпиндельной бабки и более жёсткого соединения станины с фундаментом - перевод $Dy = Dy(x,y,z)$ в функцию $Dy = Dy(z)$ или $Dy = Dy(y,z)$) с коррекцией отклонений от прямолинейности или от плоскостности.

3) Деформации $Dx(z)$ для данной конструкции несущей системы большие (> 10 мкм) и существенно зависят от координаты X (положения салазок), т.е. является функцией двух переменных $Dx(z,x)$. Отклонения $Dx(z)$ от перпендикулярности движения шпинделя зеркалу планшайбы может быть (\approx до 30%) уменьшено путем введения коррекции в систему ЧПУ (усреднённая кривая по всему рабочему объёму). Возможно выявленная существенная связь $Dx(z)$ от положения салазок (координата X) есть следствие размещения станины на демпфирующих опорах, а не на фундаментных болтах с последующей цементной заливкой или расположения станины на 3 опорах [130, 156]. Это предположение требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Конструктивные решения должны быть направлены

на перевод $Dx(z,x)$ в функцию $Dx(z)$, либо развитию системы коррекции, позволяющей компенсировать отклонения типа $Dx(z,x)$.

Представленные выводы апробированы проведенной коррекцией на 5 экземплярах станка мод. МС - 300.

В следующих разделах настоящей главы приводятся результаты исследования влияния температурных деформаций на первичные отклонения многокоординатной машины с ЧПУ на примере станка мод. МС – 300.

6.2.2. Влияние температурных деформаций узлов станка на первичные отклонения механизмов несущей системы станка

В настоящее время высокоскоростная обработка металлов резанием приобретает широкое применение [20]. В металлорежущих станках, предназначенных для высокоскоростной обработки металлов, используются высокоскоростные шпинделя с встроенными электродвигателями. Другой прогрессивной тенденцией в развитии станков является применение линейных двигателей и двигателей угловых координат без редукторов. При работе указанных приводов выделяется большое количество тепла. Это тепло отводится из станка с помощью системы охлаждения с холодильным агрегатом, устанавливаемым рядом со станком.

В станке мод. МС – 300 применяется электрошпиндель мод. CS – 16-170 мощностью 20 kW [174]. Для данной конструкции шпинделя рассеивание энергии (переход в тепло) составляет более 10% от номинальной мощности электродвигателя, т.е. 2,4 kW.

Наряду с охлаждением шпинделя в станке мод. МС - 300 применяется охлаждение двигателей (direct drive) поворота планшайбы и двигателя поворота корпуса планшайбы. Двигатель поворота корпуса планшайбы непосредственно монтируется в станину станка.

Непрерывное выделение тепла в несущей системе станка и отвод его в релейном режиме приводит, в одних случаях, к циклическому изменению температуры в узлах станка с малой теплоемкостью (шпиндельная бабка), а в

других – к стабилизации температуры режима в узлах большой теплоемкости (станина) [64].

Ниже представлены результаты исследования влияния режимов работы системы охлаждения (температурных деформаций) на точность позиционирования по линейным и угловым координатам станка мод. МС — 300.

Исследование проводилось на 5 экземплярах станка МС – 300, каждому из которых был присвоен порядковый номер (1, 2, 3, 4 и 5 соответственно), в зависимости от времени сборки.

Наряду с влиянием температурных деформаций на точность позиционирования одновременно принималось во внимание влияние и других факторов (сил трения, зазоров) с целью выявления возможности использования отклонения позиционирования в качестве диагностического признака правильности проведения процесса сборки.

6.2.2.1. Влияние температурных деформаций на точность позиционирования по линейным координатам

6.2.2.1.1. Точность позиционирования по координате X

На рис. 6.14, в качестве примера, представлены результаты измерения точности позиционирования по координате X для станка № 1. Здесь мы видим, что точностные параметры позиционирования по координате X следующие: общий показатель точности $A = 8,4$ мкм, случайная составляющая $R = 1,6 - 2,4$ мкм, отклонение обратного хода $B = 1,5$ мкм. Функциональная часть $M = 6,2$ мкм составляет львиную долю в отклонении позиционирования (74 %) и составляет резерв по повышению точности позиционирования методом введения коррекции «по точкам» по координате X. Для станка № 1 этот резерв не использовался (отклонения входят в допуск на изготовление $[A] = 10$ мкм).

В табл. 6.2 представлены результаты измерения точности позиционирования для 5 станков. Из табл. 6.2 видно, что у станка № 1 и № 2 точностные параметры близкие и их можно считать за норму, соответствующую нормальному процессу сборки станка.

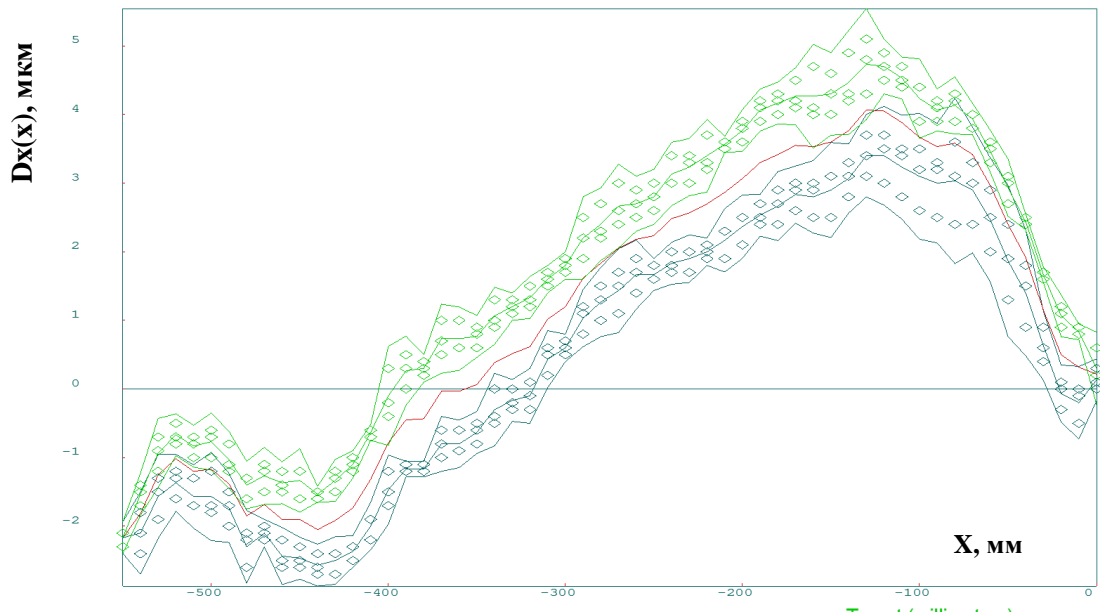


Рис.6.14. Кривые точности позиционирования $Dx(x)$ по координате X

У станка № 3 наблюдается ухудшение всех параметров точности позиционирования, особенно увеличение случайной составляющей ($6\sigma = 7\text{ мкм}$), что свидетельствует о нарушении процесса сборки узла привода по координате X . Было проверено крепление гайки ШВП к салазкам и выявлено, что она затянута слабо. После устранения дефекта параметры точности приблизились к норме (случайная составляющая $1,8\text{ мкм}$) - это станок № 3*.

Табл. 6.2

Параметры точности позиционирования по координате X
для 5 станков МС - 300, собранных в ОАО НИАТ.

Станок, №	Общая точность, А, мкм, без корр./ с корр.	Отклонение обратного хода, В, мкм, без корр./ с корр.	Случайная составляющая, R, мкм, без корр./ с корр.	Функциональная составляющая, М, мкм, без корр./ с корр.	Интервал регулирования температуры, С°
1	8,4/	1,5/	1,6-2,4/	6,2/	19°+/-1°
1*	5,2/	1,3/	2,0-2,1/	3,7/	25°+/-0,1°
2	7,9/5,2	1,4/1,7	3,8-3,2/3,0-2,3	6,3/2,8	19°+/-1°
3	20,6/10,6	2,5/1,3	7,0-7,8/7,1-7,0	14,3/2,9	19°+/-1°
3*	/ 4,5	/ 1,3	/ 1,8-1,6	/ 3,4	19°+/-1°
4	10,0/8,4	1,7/2,0	3,2-3,5/4,7-6,7	6,8/2,3	19°+/-1°
5	10,7/4,2	1,2/1,6	1,2-1,9/1,8-2,2	9,3/2,1	19°+/-0,1°

При калибровке станка № 4 было выявлено, что параметр - случайная составляющая R , ведет себя нестабильно. Это ещё более проявилось при измерении точности позиционирования по координатам Y и Z (см. 6.4.2.2.) . Было сделано предположение, что, эта нестабильность связана с релейным режимом работы системы охлаждения. Был уменьшен интервал регулирования температуры с 2°C до $0,2^{\circ}\text{C}$. Показатели точности позиционирования по координате X для станка № 5 с интервалом регулирования температуры $0,2^{\circ}$ являются вполне удовлетворительными (случайная составляющая $1,2-1,9/1,8-2,2$ мкм) и соответствуют норме.

После года работы в усиленном режиме были приведены повторно измерения точности позиционирования на станке № 1, но уже при интервале регулирования температуры $0,2^{\circ}\text{C}$. Эти данные измерения представлены в графе станок № 1*. Показатели точности позиционирования по координате X для станка № 1* не ухудшились, а улучшились.

При диапазоне регулирования $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ все показатели точности позиционирования по координате X улучшаются, хотя и незначительно.

6.2.2.1.2. Точность позиционирования по координате Y

При измерении точности позиционирования по координате Y для станка № 1 было выявлено, что параметры точности позиционирования по координате Y существенно превышают нормы точности и зависят от положения линии измерения. Для выявления факторов, вызывающих эти отклонения, были проведены исследования, результаты которых представлены ниже.

Для оценки влияния расположения линии измерения над «зеркалом» планшайбы (высоты H рис. 6.15) на точность позиционирования по координате Y на рис. 6.16 представлены кривые точности позиционирования в одинаковом масштабе.

На рис. 6.15 показана схема измерений. Здесь: 1 – салазки станка, 2 – луч лазера (линия измерения), 3 – оптический отражатель, 4 – «зеркало»

планшайбы стола, 5 – лазер, 6 – шпиндельная бабка, 7 – стойка, несущая шпиндельную бабку, перемещающаяся по салазкам вдоль оси Y .

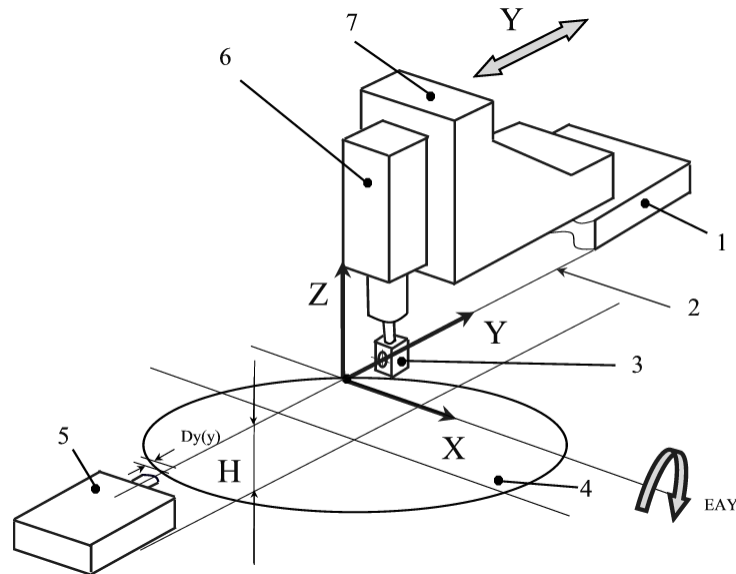


Рис. 6.15. Схема измерений отклонений позиционирования по координате Y на различной высоте измерения H

На рис. 6.16, а) представлены кривые точности позиционирования по координате Y для станка № 1 при $H = 280$ мм над плоскостью «зеркала» стола. При этой серии измерений линия измерений наиболее близко была расположена к направляющим координаты Y .

На рис. 6.16, б) представлены кривые точности позиционирования по координате Y при высоте $H = 130$ мм. Это среднее положение линии измерения над плоскостью «зеркала» стола. На рис. 6.16, в) представлены кривые точности позиционирования по координате Y при высоте $H = -12$ мм. Это самое низкое расположение линии измерения над плоскостью стола и наиболее дальнее от направляющих координаты Y .

Представленные данные рис. 6.16 а), б), в) сведены в табл. 6.3, из которой видно, что все показатели точности позиционирования с уменьшением H существенно ухудшаются.

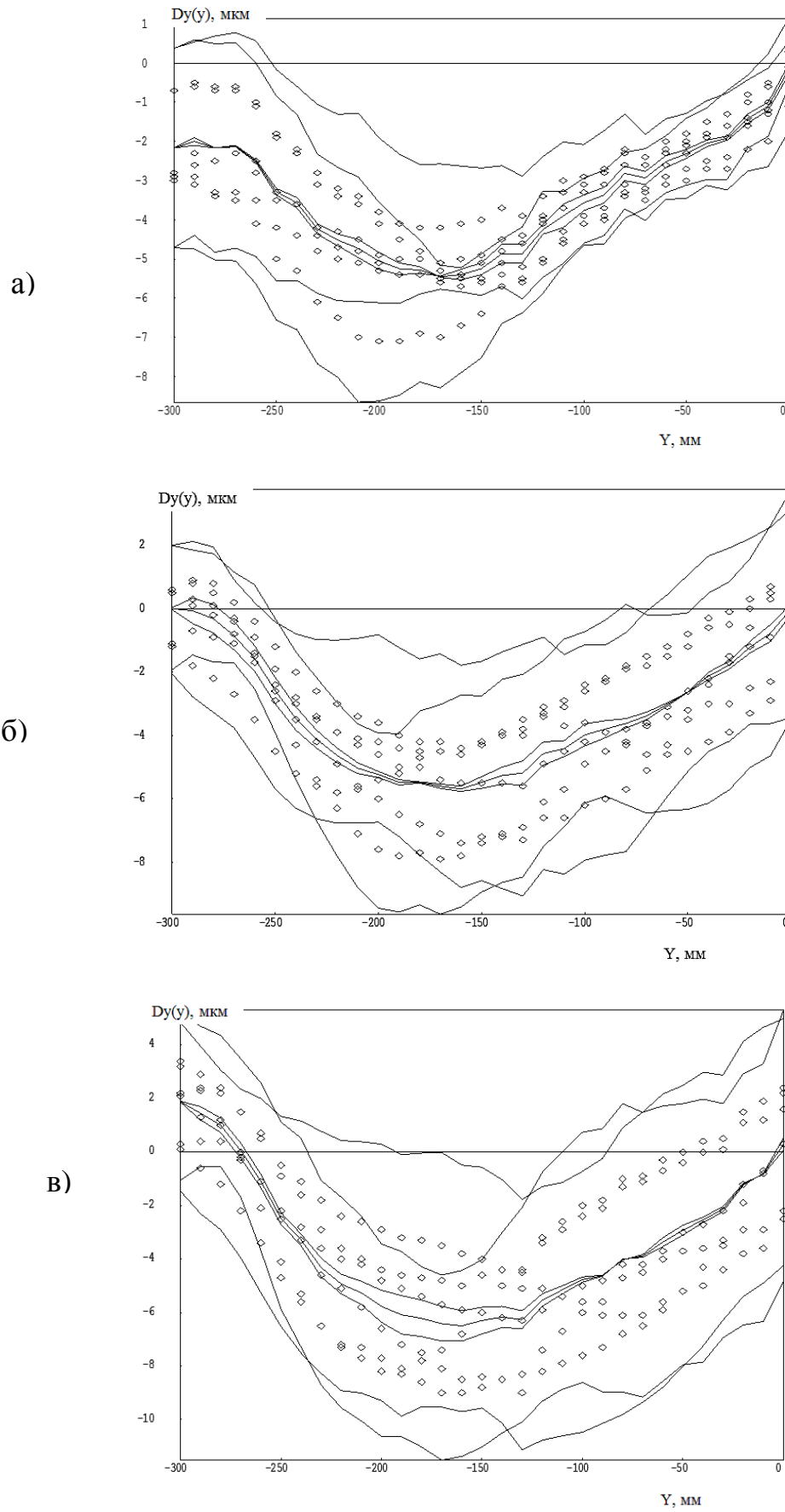


Рис. 6.16. Кривые точности позиционирования по координате Y на различной высоте измерения H

Параметры точности позиционирования по координате Y
для станка МС – 300 № 1 при различных значениях Н.

Высота Н, мм	Общая точность, А, мкм, без корр./с корр.	Отклонение обратного хода, В, мкм, без корр./с корр.	Случайная составляющая, R, мкм, без корр./с корр.	Функциональная составляющая, М, мкм, без корр./с корр.	Интервал регулирования температуры, С°
280	9,8/	0,6/	5,3-7,3/	5,3/	19°+/-1°
130	13,4/	0,9/	8,6-7,8/	5,6/	19°+/-1°
-12	16,8/	1,4/	11,5-11,6/	8,4/	19°+/-1°

Из представленных результатов измерений видно, что:

С увеличением расстояния от направляющих координаты Y точность позиционирования падает:

1) показатель А увеличивается с 9,8 мкм до 16,8 мкм. Это существенное ухудшение точности позиционирования,

2) увеличивается случайная составляющая R в общей точности позиционирования с увеличением расстояния от направляющих координаты Y (доля случайной составляющей в среднем составляет 64,9 %),

3) наблюдается увеличение отклонения «обратного хода В с 0,6 мкм до 1,4 мкм (доля этого отклонения в показателе общей точности позиционирования составляет всего 6,0 %).

Такое поведение кривых точности позиционирования можно объяснить двумя причинами:

- отклонения позиционирования, в основном, определяются поворотом стойки ЕАУ при её движении по координате Y (это объясняет увеличение отклонений позиционирования с уменьшением величины Н),

- случайная составляющая отклонений позиционирования вызывается температурными деформациями шпиндельной бабки и стойки в результате выделения и отвода тепла в шпиндельном узле.

Для подтверждения последнего предположения были проведены дополнительные исследования влияния работы системы охлаждения на точность позиционирования по координате Y .

Влияние работы системы охлаждения на точность позиционирования по координате Y

На рис. 6.17 представлены кривые точности позиционирования по Y раздельно по отдельным прогонам 1, 2, 3, и вместе для $H = 130$ мм.

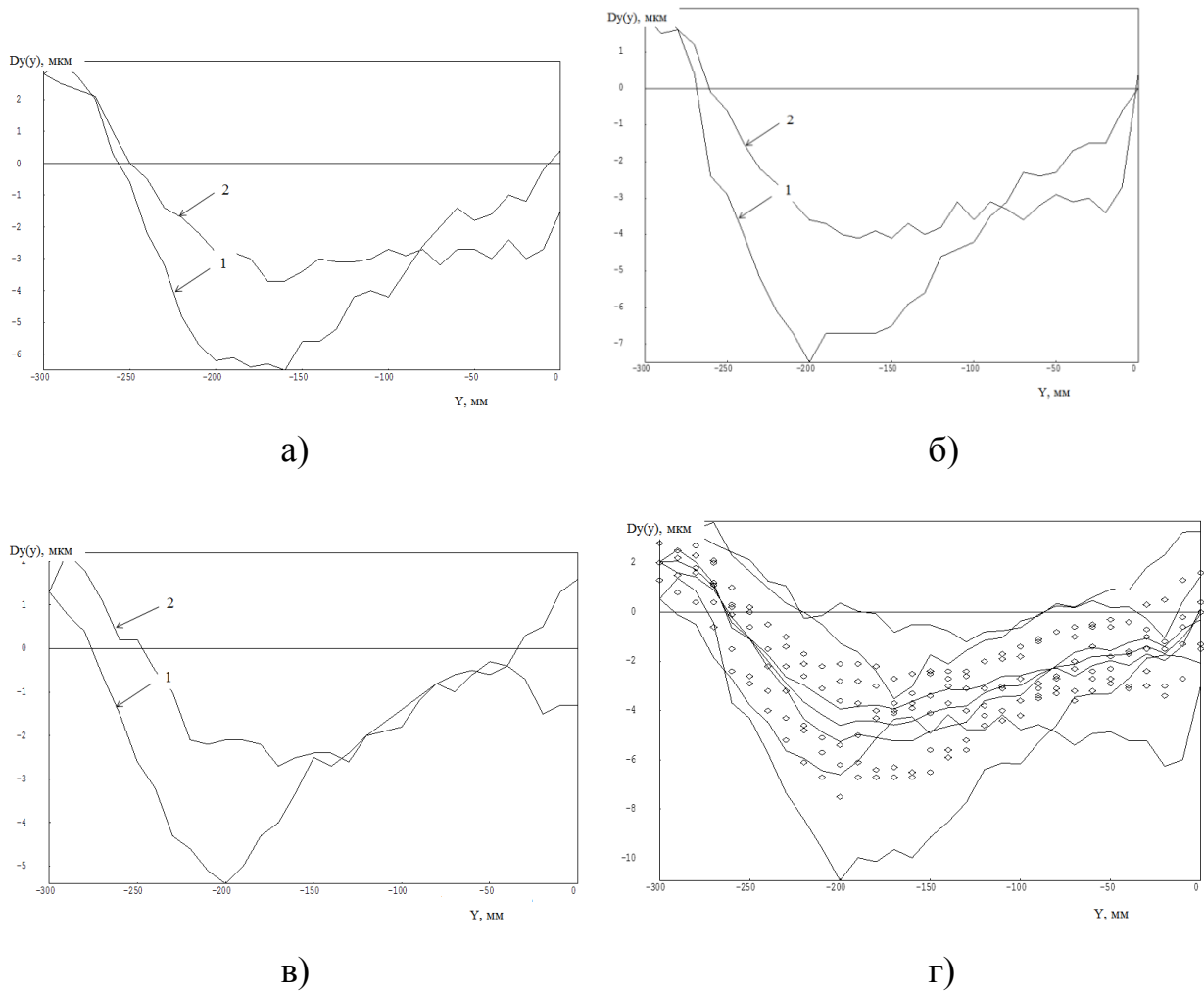


Рис. 6.17. Кривые точности позиционирования по координате Y отдельно по каждому прогону: а) 1-й прогон, б) 2-й прогон, в) 3-й прогон, г) все прогоны вместе

Из рис. 6.17 видно, что кривые прямого (1) и обратного хода (2) для разных прогонов видоизменяются и смещаются одна относительно другой. Это можно объяснить тем, что включение/выключение холодильника проис-

ходит в разные периоды (начало, середина, конец) процесса проведения измерений.

Для подтверждения этого предположения были проведены измерения точности позиционирования в ручном режиме на этой же высоте линии измерения при отключенном холодильнике и приводах. Результаты измерений представлены на рис. 6.18.

Методика измерений состояла в следующем.

1) Поворачивается винт ШВП координаты Y на один оборот – это соответствует перемещению стойки на 20 мм.

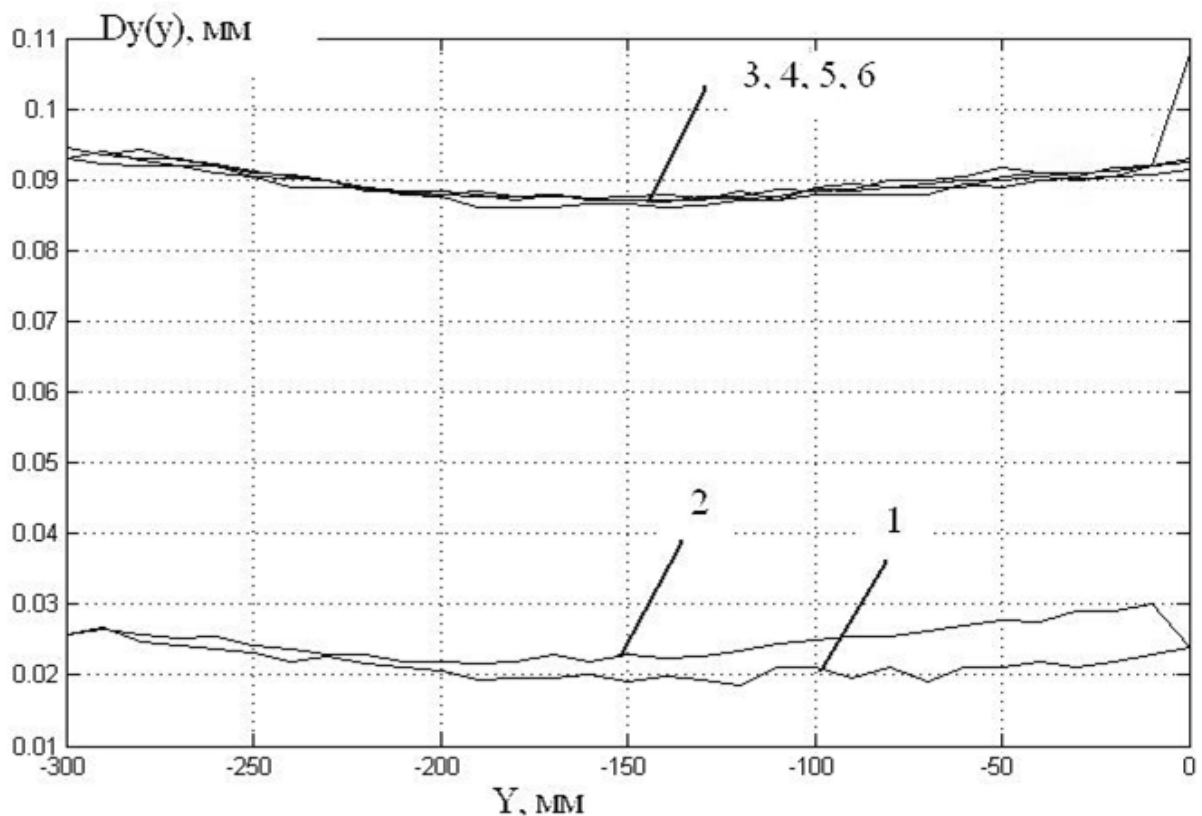


Рис. 6.18. Кривые точности позиционирования, полученные при ручном перемещении стойки и съёме информации с дисплея системы ЧПУ и лазерного интерферометра: 1 – прямой проход 1 прогона, 2 – обратный проход 1 прогона, 3 – прямой проход 2 прогона, 4 – обратный проход 2 прогона, 5 – прямой проход 3 прогона, 6 – обратный проход 3 прогона

2) Снимаются показания с дисплея системы ЧПУ, где отображается положение стойки по «линейке» - датчику обратной связи привода Y . Прини-

мается, что этот сигнал соответствует программному (заданному) значению положения стойки станка.

3) По лазерному интерферометру снимаются показания. Эти значения принимались за действительное положение стойки станка.

4) Отклонение позиционирования $Dy(y)$ определяются как разность между показаниями на дисплее системы ЧПУ и показаниями лазерного интерферометра.

Верхние кривые соответствуют 2-му и 3-му прогону, а нижние – 1-му прогону.

На рис. 6.19 представлены отдельно кривые, соответствующие 3-му прогону.

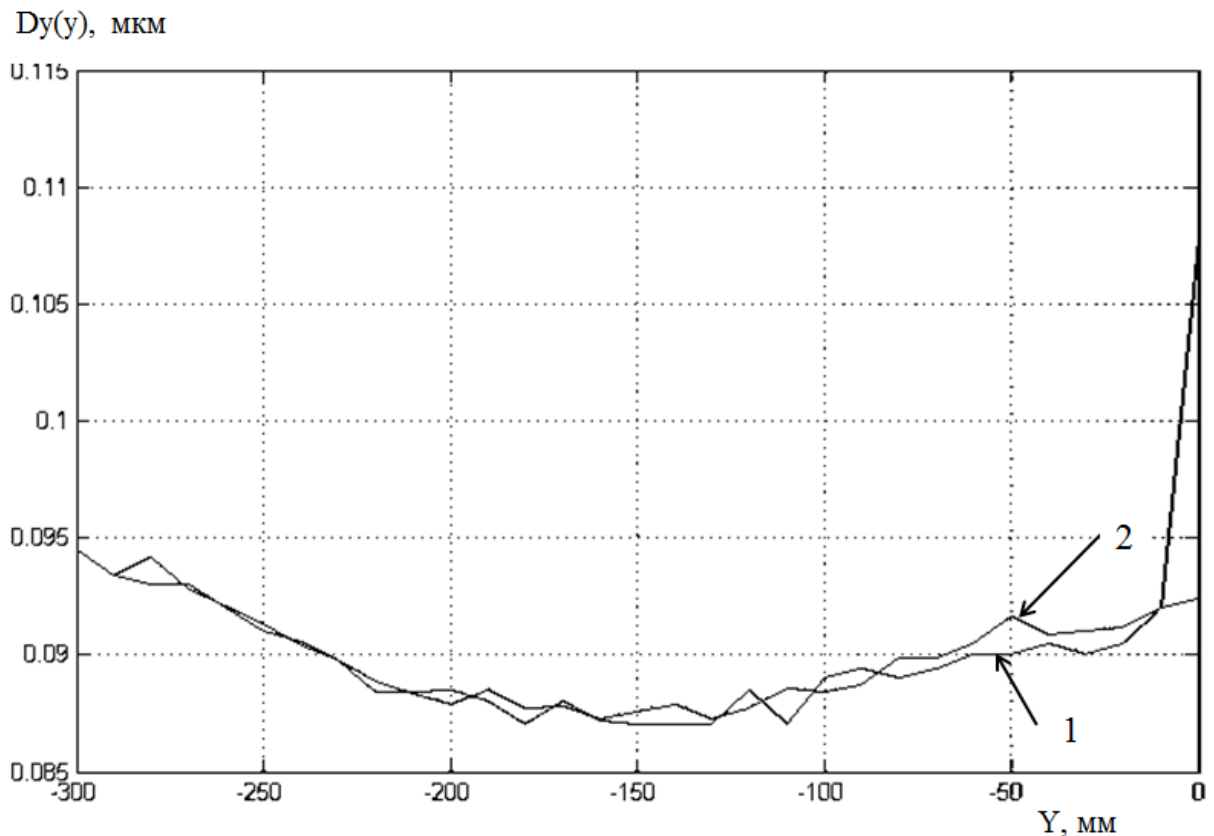


Рис. 6.19. Кривые точности позиционирования, полученные при ручном перемещении стойки и съёме информации с дисплея системы ЧПУ и лазерного интерферометра: 1 – прямой проход 3 прогона, 2 – обратный проход 3 прогона

Как мы видим из рис. 6.18, кривые отклонений прямого и обратного хода практически совпадают для 2-го и 3-го прогонов. Различие между прямым и обратным проходом наблюдаются при 1-ом прогоне. Последнее объясняется тем, что станок ещё не успел к моменту проведения исследований к тепловому равновесию (полностью остыть).

Таким образом, можно утверждать, что холодильная система, работающая в релейном режиме, существенно влияет на точность позиционирования по координате Y.

При этом следует отметить, что регулярная работа холодильника (детерминированная) вызывает отклонения позиционирования, которые относятся по процедуре оценки программным обеспечением лазерного интерферометра ML 10 в соответствии с ISO 230-2, как случайные.

В табл. 6.4 представлены результаты измерения точности позиционирования по координате Y для 5 станков, собранных в ОАО НИАТ.

Табл. 6.4

Параметры точности позиционирования по координате Y
для 5 станков MC – 300 при H = 150 мм.

Станок, №	Общая точность, А, мкм, без корр./ с корр.	Отклонение обратного хода, В, мкм, без корр./ с корр.	Случайная составляющая, R, мкм, без корр./ с корр.	Функциональная составляющая, М, мкм, без корр./ с корр.	Интервал регулирования температуры, °С
1	13,4/	0,9/	8,6-7,8/	5,7/	19°+/-1°
1*	5,0/	0,6/	1,6-1,7/	3,6/	25°+/-0,1°
2	23,0/13,6	1,4/2,9	9,3-8,4/9,0-8,7	14,7/3,6	19°+/-1°
3	24,8	1,9	14,8-18,7	9,9	19°+/-1°
3*	15,7/ 8,2	1,2/ 1,8	5,4-5,0/3,4-7,2	12,4/ 3,8	19°+/-0,1°
4	15,1/10,5	0,8/0,7	10,2-8,8/7,5-8,2	6,8/4,0	19°+/-1°
5	6,5/	0,7/	3,2-2,6/	4,5/	19°+/-0,1°

Станок № 1* - станок после года работы в усиленном режиме.

Станок № 3* - станок после устранения дефекта сборки гайки ШВП координаты X и перехода на диапазон регулирования температуры в холодильнике $19^{\circ} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

В результате перехода на диапазон регулирования $19 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ показатель точности А у станков № 3*, № 5 и № 1* входит в допуск заводской приёмки (8 мкм).

Аналогичная картина влияния работы холодильника на точность позиционирования наблюдается также при измерении точности позиционирования по координате Z.

6.2.2.1.3. Точность позиционирования по координате Z

На рис. 6.20 представлена схема измерений отклонений позиционирования по координате Z.

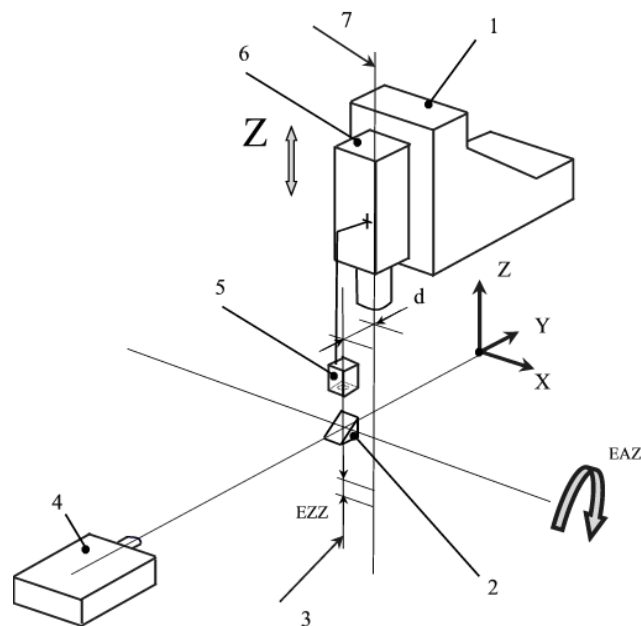
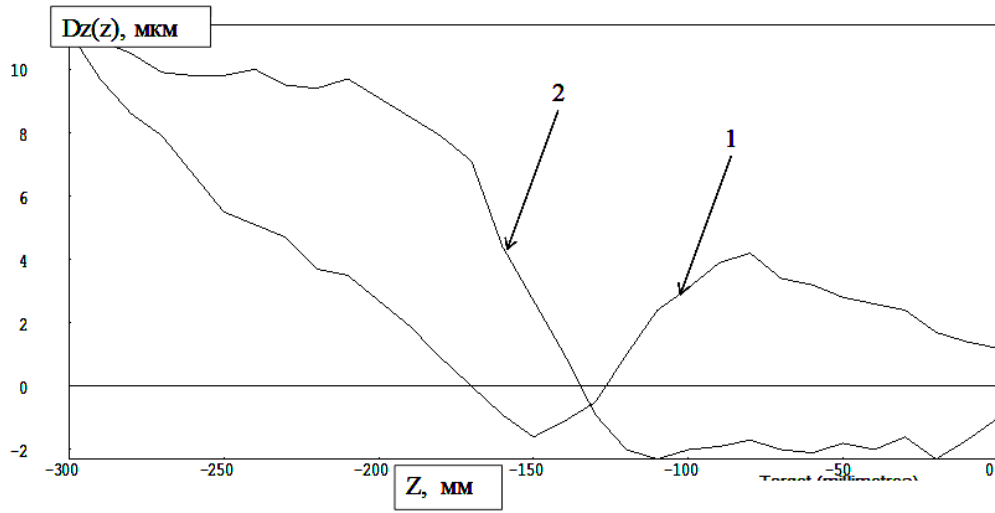


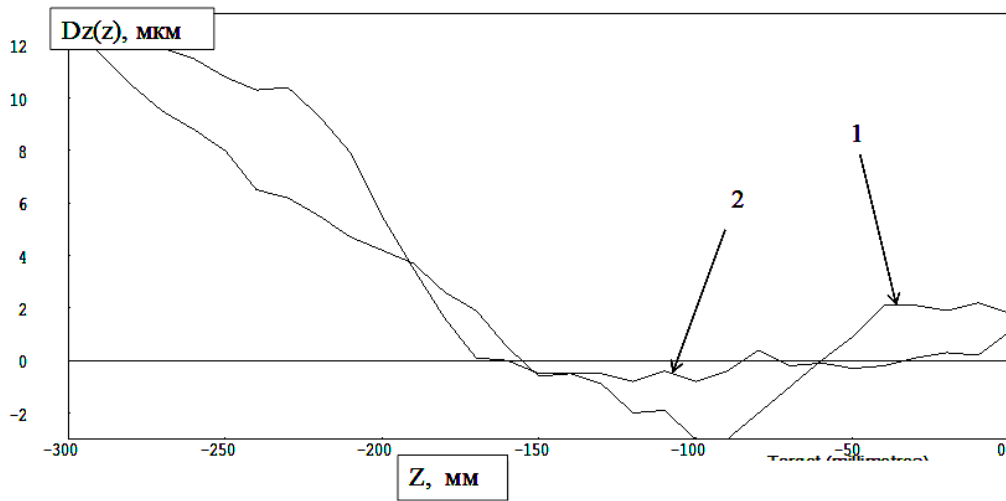
Рис. 6.20. Схема измерения отклонений позиционирования по координате Z

Здесь: 1 – стойка, 2 – зеркало поворота луча лазера на 90° , 3 – линия измерения, 4 – лазер, 5 – оптический отражатель, 6 - шпиндельная бабка, 7 – ось шпинделя.

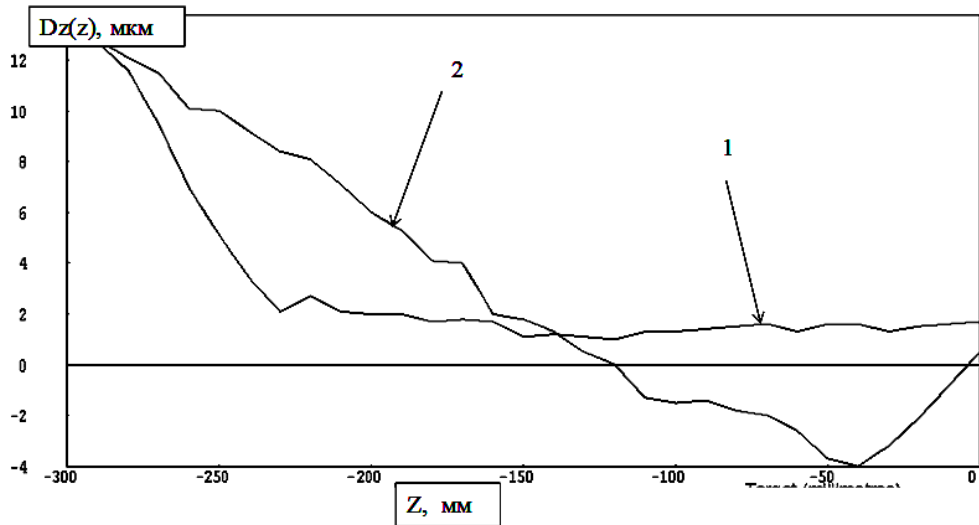
Кривые точности позиционирования по Z представлены отдельно по отдельным прогонам 1, 2, 3, и вместе при $d = 50$ мм на рис. 6.21.



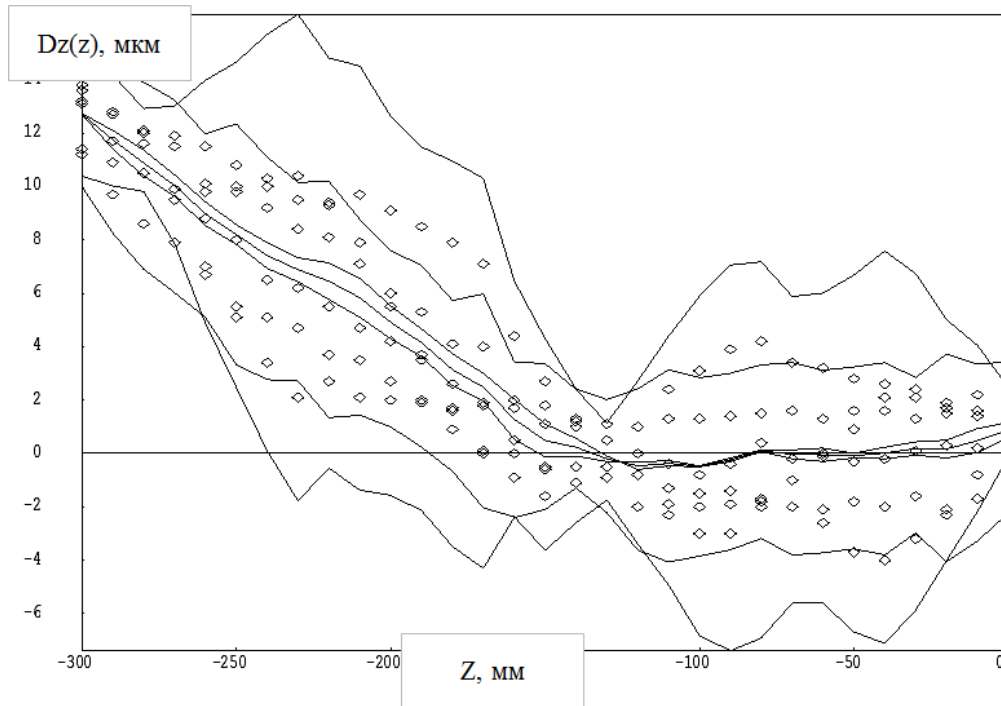
a)



б)



B)



г)

Рис. 6.21. Кривые точности позиционирования по координате Z отдельно по каждому прогону: а) 1-й прогон, б) 2-й прогон, в) 3-й прогон, г) все прогоны вместе

Измерения точности позиционирования по координате Z с выключенными приводами и холодильником не проводились в виду невозможности (для данной конструкции станка) перемещать шпиндельную бабку в ручном режиме с отключёнными приводами и холодильником.

Мы видим, что случайная составляющая (влияние холодильника переходит в случайную составляющую) очень велика (15 – 18 мкм) при общем показателе $A = 23,8$ мкм.

В табл. 6.5 представлены результаты измерения точности позиционирования по координате Z для 5 станков, собранных в ОАО НИАТ.

1 - измерение на станке № 1 при расположении линии измерения к оси вращения шпинделя, соответствующее $d = 120$ мм.

1* - измерение на станке № 1 при максимально близком расположении линии измерения к оси вращения шпинделя $< d = 10$ мм.

4 - измерение на станке № 4 при смещении оси измерения от оси вращения шпинделя соответствующее $Y = -94$ мм, $d = + 50$ мм,

4* - измерение на станке № 4 при смещении оси измерения от оси вращения шпинделя соответствующее $Y = -141$ мм, $d = - 50$ мм,

4** - измерение на станке № 4 при смещении оси измерения от оси вращения шпинделя соответствующее $Y = -229$ мм, $d = -100$ мм,

Табл. 6.5

Показатели точности позиционирования по координате Z
для 5 станков МС – 300

Станок, №	Общая точность, А, мкм, без корр./ с корр.	Отклонение обратного хода, В, мкм, без корр./ с корр.	Случайная составляющая, R, мкм, без корр./ с корр.	Функциональная составляющая, М, мкм, без корр./ с корр.	Интервал регулирования температуры, С°
1	23,8	1,5	14,7-18,2	13,2	19°+/-1°
1*	8,5	0,6	6,0-8,4	1,1	25°+/-0,1°
2	8,4	1,1	7,6-7,2	2,2	19°+/-1°
3	5,9/3,0	0,2/0,3	2,0-1,4/1,8-1,8	4,7/1,6	0,2°
4	- 15,5	2,0	11,0-9,1	8,8	19°+/-1°
4*	+11,9	2,0	4,1-9,2	7,3	19°+/-1°
4**	-15,2	1,9	10,2-8,3	8,6	19°+/-1°
5	-22,2	1,7	3,3-3,8	19,8	19°+/-0,1°
5*	-17,3/6,2	2,4/1,8	2,4-3,2/3,6-4,8	14,8/1,2	19°+/-0,1°

5 - измерение на станке № 6 при смещении оси измерения от оси вращения шпинделя соответствующее $Y = -219$ мм, $d = - 100$ мм,

5* - измерение на станке № 6 при смещении оси измерения от оси вращения шпинделя соответствующее $Y = -117$ мм, $d = - 50$ мм,

Из табл. 6.5 явно видно, что уменьшение диапазона регулирования температуры с 2° до 0,2° существенно уменьшает случайную составляющую до уровня < 4,8 мкм.

Результаты измерений параметров точности позиционирования по координате Z также показывают, что на них существенно влияют параметры расположения линии измерения, что косвенно указывает на существенное влияние отклонений EAZ и EBZ шпиндельной бабки при её перемещении

вдоль оси Z . При определённом расположении линии измерения относительно оси вращения шпинделя возможна компенсация влияния отклонений EAZ и EBZ и будут получены «повышенные» показатели точности позиционирования по координате Z . Этому случаю соответствуют измерения 1 и измерения 1*

6.2.2.2. Влияние температурных деформаций на точность позиционирования по угловым координатам

6.2.2.2.1. Точность позиционирования планшайбы (координата C)

На рис. 6.22 представлен общий вид станка в процессе измерения отклонений позиционирования по угловой координате C . Здесь: 1 – лазер, 2 – расщепитель, 3 – индексирующее устройство $RX 10$, 4 – планшайба.

В табл. 6.6 представлены результаты измерения точности позиционирования планшайбы (координата C) для 5 станков, собранных в ОАО НИАТ.

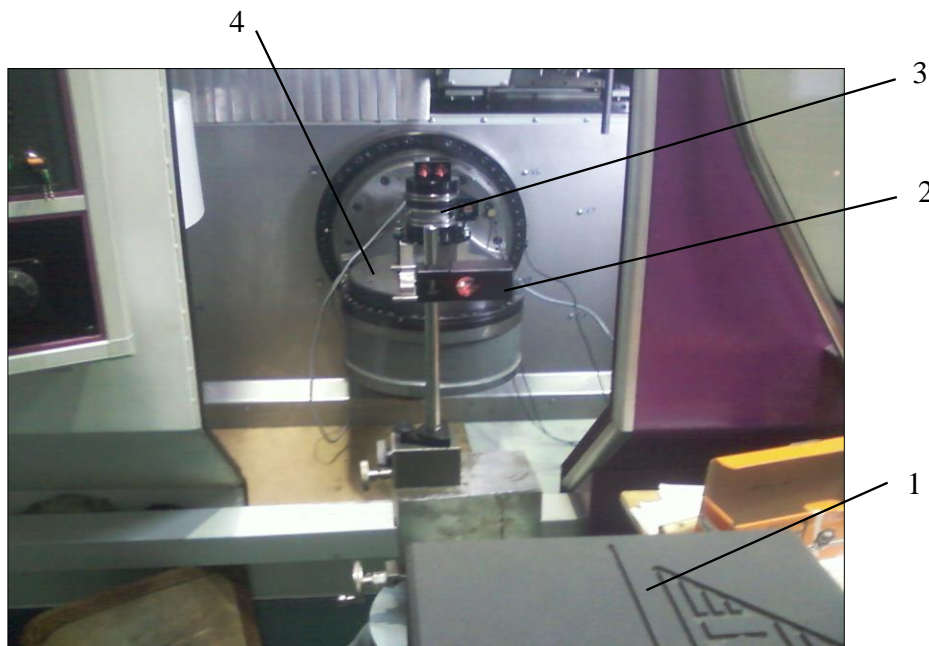


Рис. 6.22. Общий вид измерения отклонений позиционирования по угловой координате C с помощью лазерного интерферометра $ML 10$ и индексирующего устройства $RX 10$

Точность позиционирования планшайбы хорошая, её показатели входят в нормы точности станка за исключением станка № 4, у которого повышена случайная составляющая $R = 5,4-3,9$ угл. сек. (причина повышения не

выяснена), в соответствии с которой общий показатель отклонения $A = 7,6$ мкм при норме $A = 6,0$ мкм.

Уменьшение диапазона регулирования температуры с 2° до $0,2^\circ$ существенного влияния на случайную составляющую не оказало. Проведение коррекции функциональной части при $M = 4''$ не целесообразно, потому что система управления ЧПУ (Siemens, 840 D) позволяет вводить коррекцию с дискретностью $0,001^\circ$ ($3,6''$). Для повышения точности необходимо, в первую очередь, уменьшение дискретности ввода коррекции и дальнейшее изучение «природы» случайной составляющей и выработки мероприятий по её уменьшению

Табл. 6.6

Показатели точности позиционирования по координате С
для 5 станков мод. МС – 300

Станок, №	Общая точность, А, углов. сек, без корр./ с корр.	Отклонение обратного хода, В, углов. сек, без корр./ с корр.	Случайная составляющая, R, углов. сек, без корр./ с корр.	Функциональная составляющая, М, углов. сек, без корр./ с корр.	Интервал регулирования температуры, C°
1	6,0/6,5	1,4/0,9	3,0-1,8/3,9-4,0	3,7/2,6	$19^\circ \pm 1^\circ$
1*	17,4/	2,0/	13,8-10,0/	4,9/	$25^\circ \pm 0,1^\circ$
1**	6,6/	1,5/	1,5-1,5/	4,3/	$25^\circ \pm 0,1^\circ$
2	3,7/	0,6/	1,9-1,3/	2,4/	$19^\circ \pm 1^\circ$
3	5,8/	1,2/	2,6-3,5/	2,7/	$19^\circ \pm 0,1^\circ$
4	7,6/	2,6/	5,4-3,9/	1,1/	$19^\circ \pm 1^\circ$
5	4,0/	1,0/	3,5-2,31/	1,9/	$19^\circ \pm 0,1^\circ$

В табл. 6.6 представлены:

в строке 1 – данные измерения для станка №1 после изготовления и сдачи в эксплуатацию,

в строке 1* - данные измерения для станка №1 после эксплуатации станка 1,5 года и переборки узла планшайбы после его заклинивания при неустойчившемся тепловом режиме (измерения через 20 мин. после включения станка),

в строке 1** - данные измерения для станка №1 после эксплуатации станка 1,5 года и переборки узла планшайбы, в установившемся тепловом режиме (измерения через 2 часа после включения станка).

В процессе исследования точности позиционирования планшайбы (станок № 1*) было выявлено, что поведение кривых точности позиционирования зависит от состояния (стационарности) теплового режима планшайбы и корпуса планшайбы. При неустановившемся тепловом режиме (измерения через ≈ 20 мин. после включения станка) кривые точности «сползают» с течением времени (рис. 6.23), а в установившемся тепловом режиме (измерения через 2 часа после включения станка) кривые прямого и обратного хода группируются и отстоят на величину отклонения обратного хода (рис. 6.24).

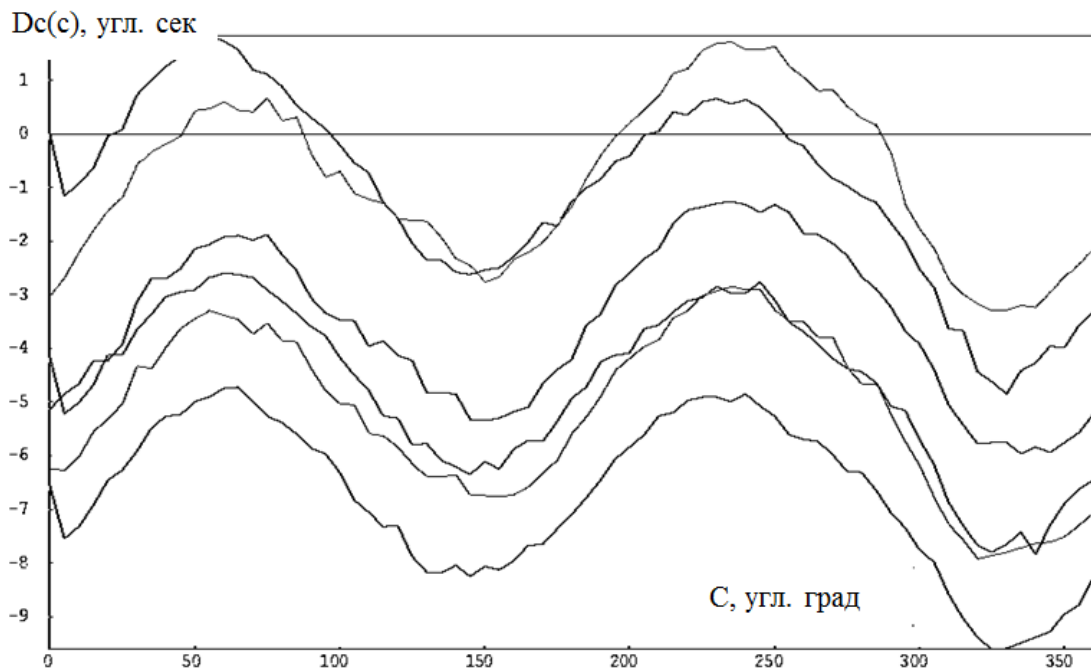


Рис. 6.23. Кривые точности позиционирования по координате C для 3 прогонов станок № 1* (измерения через ≈ 20 мин. после включения станка)

Время выхода на установившийся режим необходимо учитывать при проведении калибровки станка и при его эксплуатации. Время выхода определяется экспериментально, методом «проб и ошибок», критерием является поведение кривых точности позиционирования.

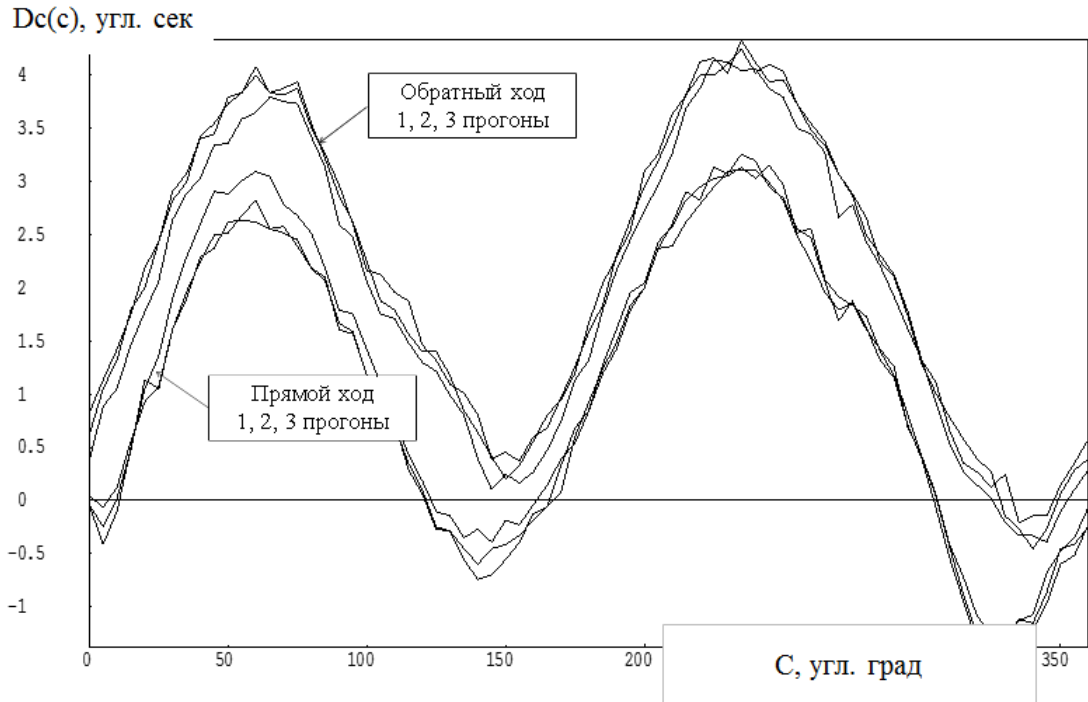


Рис. 6.24. Кривые точности позиционирования по координате C для станка № 1** (измерение через 2 часа после включения станка)

6.2.2.2.2. Точность позиционирования корпуса планшайбы (координата B)

Конструкция узла поворота корпуса планшайбы сложнее узла поворота планшайбы и по весу узел поворота корпуса планшайбы значительно тяжелее узла поворота планшайбы. Всё это затрудняет сборку узла и его присоединение к станку. При сборке в некоторых экземплярах станков были допущены ошибки, последствия которых проявились при измерении отклонений позиционирования по координате B .

На рис. 6.25 представлен общий вид станка в процессе измерения отклонений позиционирования по угловой координате B .

Здесь: 1 – луч лазера, 2 - расщепитель, 3 - индексирующего устройства RX 10, 4 – планшайба, 5 – корпус планшайбы.

В табл. 6.7 представлены результаты измерений отклонений позиционирования корпуса планшайбы.

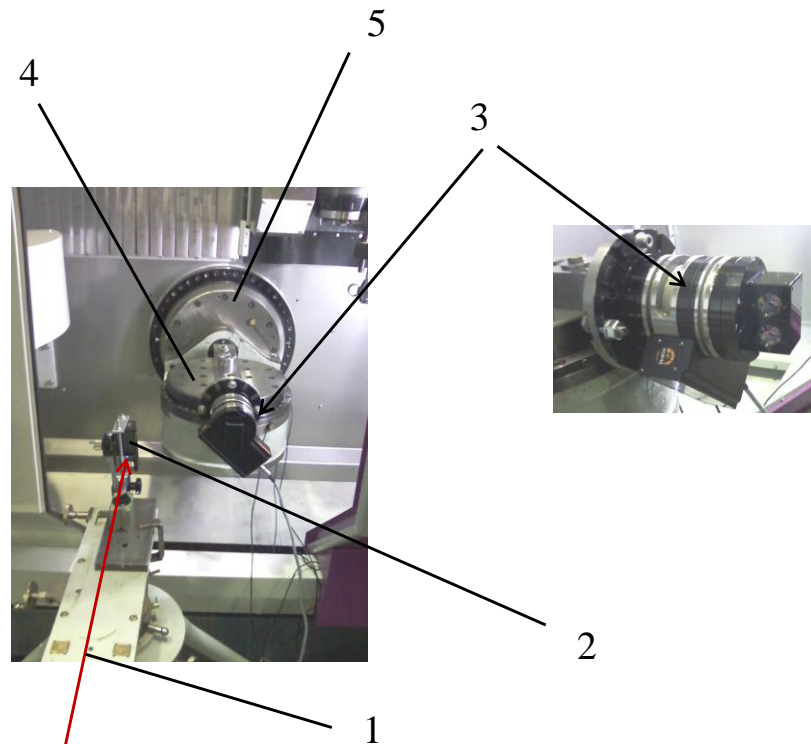


Рис. 6.25. Общий вид измерений отклонений позиционирования по В с помощью лазерного интерферометра ML 10 и устройства RX 10

Табл. 6.7

Показатели точности позиционирования по координате В
для 5 станков МС – 300

Станок, №	Общая точность, А, углов. сек, без корр./ с корр.	Отклонение обратного хода, В, углов. сек, без корр./ с корр.	Случайная составляющая, R, углов. сек, без корр./ с корр.	Функциональная составляющая, М, углов. сек, без корр./ с корр.	Интервал регулирования температуры, С°
1	/7,4	/ 1,4	/5,1-4,9	/2,1	19+/-1°
1*	6,4/	1,6/	4,5-4,1/	2,8	25°+/-0,1°
2	22,6 / 11,1	1,0/1,2	6,9-5,2/6,3-5,3	15,9/5,6	19+/-1°
3	28,5/8,3	3,2/2,4	1,6-1,8/4,0-3,0	26,3/3,3	19+/-0,1°
4	55,2/43,2	28,4/23,5	16,4-23,2/16,3-32,8	26,4/9,5	19+/-1°
5	16,6/12,8	7,6/7,0	2,9-2,4/3,7-2,3	12,6/3,5	19+/-0,1°
5*	/6,2	/1,0	/1,6-1,0	/4,6	19+/-0,1°

В табл. 6.7 приведены:

в строке 1* - данные измерений для станка №1 после эксплуатации станка 1,5 года и переборки узла планшайбы,

в строке 5* - данные измерений для станка № 5 после устранения дефекта.

По результатам исследования точности позиционирования корпуса планшайбы (координата В) можно сделать выводы:

1) Уменьшение диапазона регулирования температуры с 2° до $0,2^\circ$ существенного влияния на случайную составляющую отклонения позиционирования координаты В не оказывает.

2) Коррекция функциональной части отклонения имеет прямой смысл и позволяет добиться показателей точности, приближающихся к техническому заданию на изготовление станка ($A = 6''$). Ограничивающим фактором является предел ввода коррекции с дискретностью $0,001^\circ$ ($3,6''$) в системе ЧПУ (Siemens, 840 D). Для дальнейшего повышения точности необходимо, в первую очередь, дальнейшее изучение «природы» случайной составляющей и уменьшение дискретности ввода коррекции.

ГЛАВА VII. ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ (СИЛ ИНЕРЦИИ) НА ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИО МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ

В предыдущей главе были рассмотрены вопросы влияния квазистатических возмущающих факторов на точность положения ИО машины в пространстве. Были рассмотрены квазистатические режимы испытаний геометрической точности многокоординатной машины с ЧПУ и влияние температурных деформаций узлов на первичные отклонения механизмов несущей системы машины.

Многокоординатные машины становятся всё более быстроходными. Поэтому является очень важным исследование влияния динамических свойств НС на точность движения ИО машины и поиск методов уменьшения этого влияния.

7.1. Динамический режим испытаний на холостом ходу (состояние 3)

При этих испытаниях возникают дополнительные силы, действующие на несущую систему машины. Это, главным образом, силы инерции $F_{и}$ и силы трения $F_{т}$ (переход от трения покоя $F_{тп}$ к трению движения $F_{тд}$). Выделением тепла за счёт диссипации энергии при трении движения по сравнению с теплом, выделяемым в электродвигателях и отводимым холодильной установкой, можно пренебречь при данных испытаниях.

Увеличение отклонений исполнительных органов машины с ЧПУ за счёт динамических нагрузок может достигать 30% [170, 178,]. Поэтому изучение влияния динамических нагрузок на искажение траектории движения ИО машины является весьма актуальным.

7.1.1. Динамическая модель несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ

Дополнительные силы, возникающие при испытаниях в динамическом режиме, влияют на траекторию движения через упругие деформации, кото-

рые, определяются величиной силы инерции, динамической податливостью и диссипацией.

Для исследования влияния динамических свойств НС на точность движения ИО машины, несущую механизм «управляемый по программе ползун» (рис. 2.3) представляют в виде (рис. 7.1) [102].

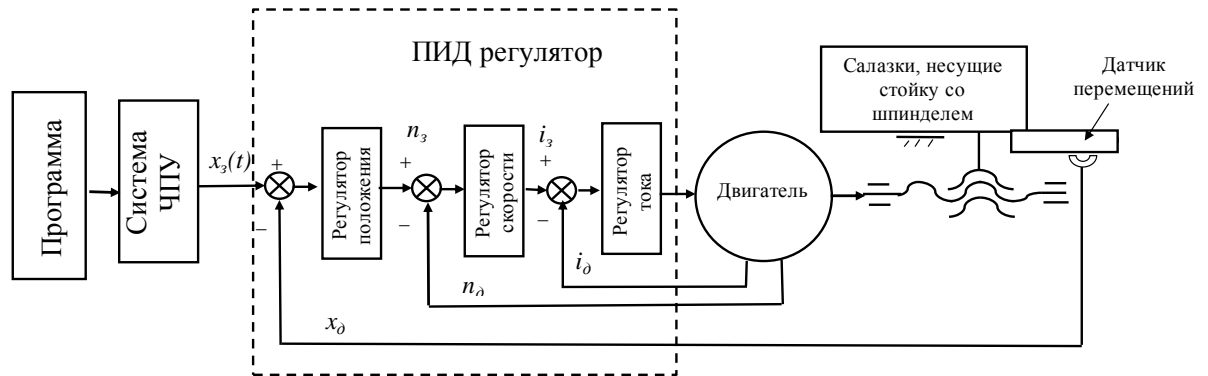


Рис. 7.1. Схема привода подачи по линейной координате X

Здесь: $x_3(t)$ – заданная программой управления станком координата X , x_0 – действительная координата X , n_3 – заданная скорость вращения ротора двигателя, n_0 – действительная скорость вращения ротора двигателя, i_3 – заданный ток управления электродвигателем, i_0 – действительный ток управления электродвигателем.

Для решения задач анализа и синтеза точности многокоординатных машин с ЧПУ в динамическом режиме предлагается несущую систему машины представить в виде двух взаимосвязанных подсистем I и II (рис. 7.2).

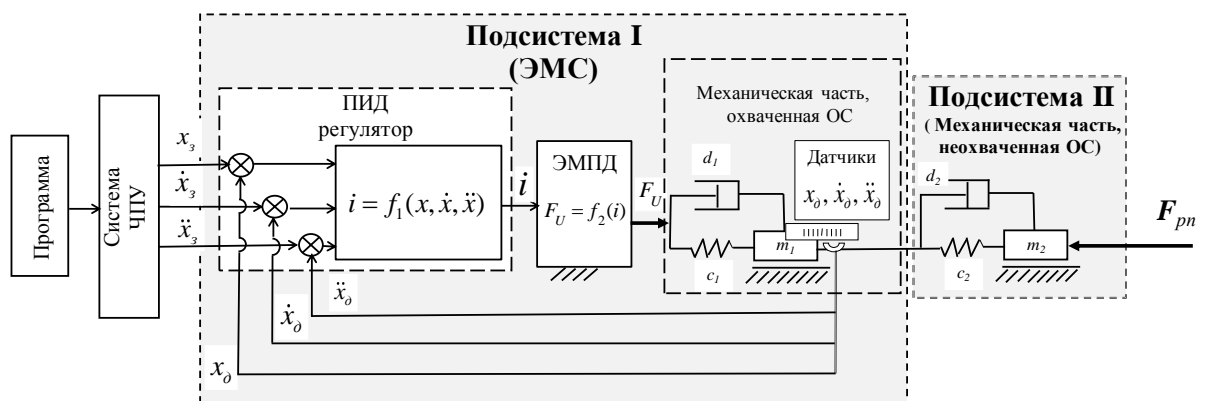


Рис. 7.2. Блок - схема несущей системы «координата X » в виде двух взаимосвязанных подсистем I и II

Подсистема I – это часть несущей системы, охваченная обратными связями. Она представляет собой электромеханическую систему (ЭМС), включающую в себя: ПИД регулятор, электродвигатель с электромагнитным полем (ЭМПД) и механическую часть, охваченную обратной связью. В случае станка МС - 300 механическая часть, охваченная обратной связью, содержит: ротор двигателя, зубчато-ремённую передачу, предохранительную муфту, ШВП и салазки. На блок - схеме механическая часть представлена в виде колебательной системы, состоящей из приведенной массы m_1 , приведенной жесткости c_1 и демпфирования d_1 .

Подсистема II – это оставшаяся механическая часть несущей системы, неохваченная обратными связями. В частности, применительно к несущей системе координаты X – это все механические узлы, расположенные на салазках, а именно, стойка, с расположенной на ней шпиндельной бабкой, несущей шпиндель. Это чисто механическая система, которую можно представить в виде колебательной системы, состоящей из приведенной массы m_2 , приведенной жесткости c_2 и демпфирования d_2 .

На салазках располагается приёмник (каретка) сигнала обратной связи по положению x_∂ с линейки (*ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH*), расположенной на станине станка. Сигнал, снимаемый с датчика скорости, установленного на валу электродвигателя, считается пропорциональным действительной скорости \dot{x}_∂ движения салазок, а сигнал о текущем значении тока двигателя - действительному значению ускорения \ddot{x}_∂ движения салазок. Сигналы x_∂ , \dot{x}_∂ , \ddot{x}_∂ используются в ПИД – регуляторе для выработки управляющего сигнала – тока $i = f_1(x_3, \dot{x}_3, \ddot{x}_3, x_\partial, \dot{x}_\partial, \ddot{x}_\partial)$, подаваемого на двигатель привода. В двигателе ток i изменяет электромагнитное поле и соответственно движущий крутящий момент $F_U = f_2(i)$, действующий между статором и ротором.

Данное представление является дальнейшим развитием подхода к исследованию динамики машин, предложенного проф. М. З. Коловским [46].

Представленная блок-схема является основой для исследования поведения несущей системы в различных режимах, среди которых можно выделить следующие:

а) - невозмущённое состояние ($x_3(t) = 0, \dot{x}_3(t) = 0, \ddot{x}_3(t) = 0, F(t) = 0$) (система в покое: отсутствует воздействие на несущую систему со стороны системы ЧПУ и со стороны рабочего процесса);

б) - квазистатическое силовое нагружение при заданном нулевом значении управляемой координаты ($x_3(t) = 0, F_i \neq 0, i = 1, \dots, n$) (измерение статической жесткости);

в) - нагружение несущей системы заданным силовым воздействием, например, ступенчатым силовым воздействием, при заданном нулевом значении управляемой координаты ($x_3(t) = 0, \dot{x}_3(t) = 0, \ddot{x}_3(t) = 0, F(t) = 500 \text{ Н}$ при $t < t_0, F(t) = 0$ при $t \geq t_0$) (измерение динамической жесткости по реакции на ступенчатое силовое воздействие 500 Н);

г) - движение исполнительного органа машины при заданном ступенчатом воздействии по управляемой координате и нулевом силовом воздействии ($x_3(t) = 0$ при $t < t_0, x_3(t) = X = \text{Const}$ при $t \geq t_0, F(t) = 0$) (изучение реакции привода на ступенчатое изменение управляемой координаты);

д) - движение исполнительного органа машины при заданной эталонной траектории и нулевом силовом воздействии ($x_3(t) = 0$ при $t < t_0, x_3(t) = \sin(\omega t)$ при $t \geq t_0, F(t) = 0$) (изучение движения исполнительного органа машины по эталонным траекториям на холостом ходу (без нагрузки на рабочий орган));

е) - движение исполнительного органа машины при заданной эталонной траектории и силовом воздействии, меняющемся во времени ($x_3(t) = 0$ при $t < t_0, x_3(t) = \sin(\omega t)$ при $t \geq t_0, F(t) = \text{Var}$) (обработка деталей - образцов);

ж) - движение исполнительного органа машины по заданной произвольной траектории и силовом воздействии, меняющемся во времени ($x_3(t) =$

$Var, F(t) = Var$ (общий случай изучения движения исполнительного органа машины).

Ниже представлены результаты экспериментального исследования поведения несущих систем многокоординатных станков с ЧПУ в соответствии с рассмотренными режимами.

7.1.2. Поведение несущей системы в невозмущённом состоянии (режим а)

На рис. 7.3 представлена кривая «перемещение оптического отражателя лазерного интерферометра ML 10, установленного на шпинделе станка MC - 300, относительно зеркала планшайбы – время», а на рис. 7.4 спектр, соответствующий этому перемещению для режима а).

Из рис. 7.3 - 7.4 мы видим, что отклонения вдоль оси X при отсутствии возмущающих воздействий от управляющей программы и со стороны рабочего процесса малы и находятся в диапазоне $-0,0003 \div 0,0006$ мм.

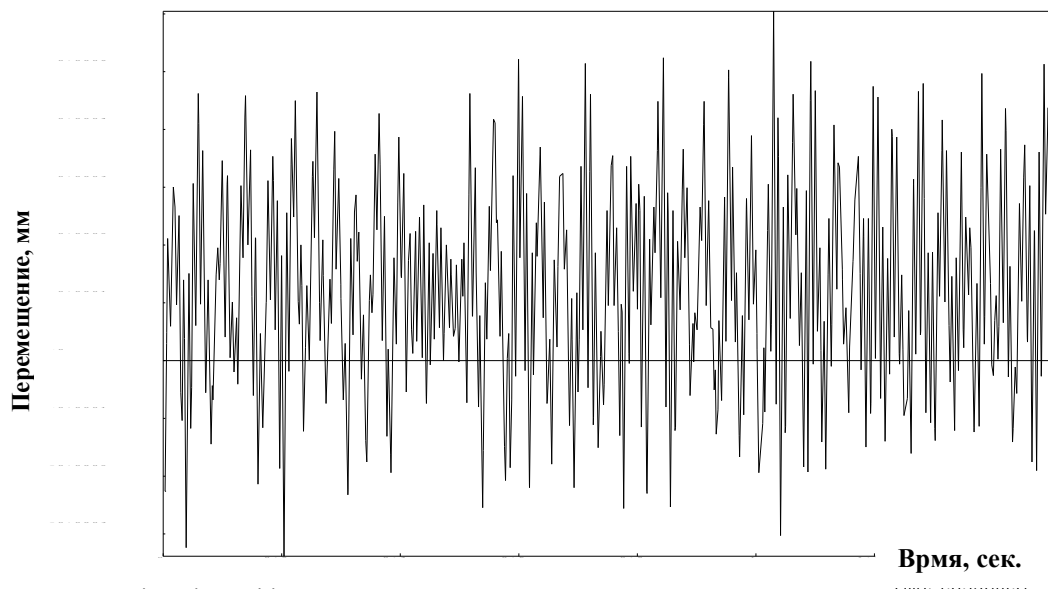


Рис. 7.3. Перемещение салазок вдоль оси X при отсутствии воздействий на несущую систему со стороны системы ЧПУ и со стороны рабочего процесса

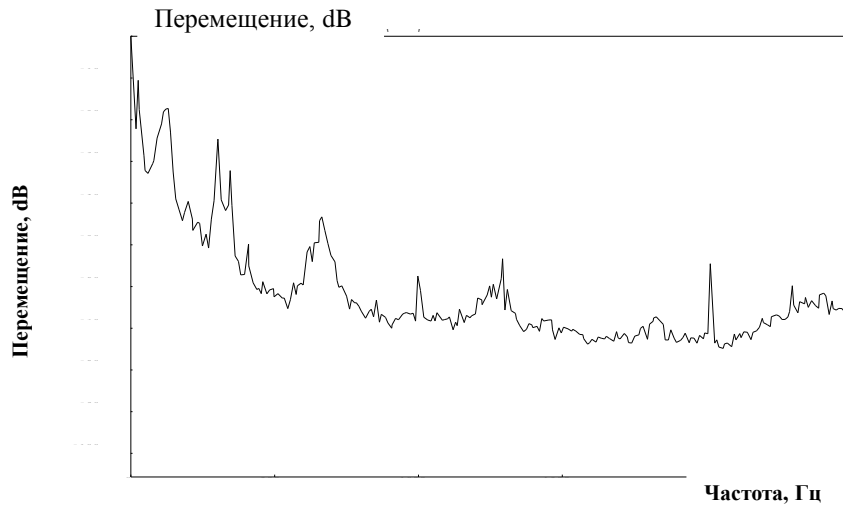


Рис. 7.4. Спектр перемещений салазок вдоль оси X при отсутствии воздействий на несущую систему со стороны системы ЧПУ и со стороны рабочего процесса

7.1.3. Реакция несущей системы на силовое ступенчатое воздействие со стороны рабочего процесса (режим в)

Нагружение несущей системы станка (корпус шпинделя – планшайба стола) осуществляется через винтовой домкрат и динамометр до нагружающей силы, равной 500 Н (рис. 7.5). В процессе нагружения происходит накоп-



Рис. 7.5. Общий вид станка, подготовленного для измерения отклика несущей системы на ступенчатое силовое воздействие (планшайба - станна)

ление потенциальной энергии в деформациях звеньев механизмов несущей системы станка (стол→шпиндель). Далее, с помощью спускового механизма резко снимается нагрузка в несущей системе (механически отсоединяется винтовой домкрат). В этот момент потенциальная энергия в несущей системе начинает переходить в энергию движения отдельных элементов несущей системы станка. Как правило, звенья несущей системы совершают сложные затухающие колебания. В настоящих исследованиях записывалось относительное движение корпуса шпинделя относительно станины и зеркала планшайбы относительно станины с помощью лазерного интерферометра ML10.

На рис. 7.6 – 7.8 представлена реакция несущей системы (по координатам X, Y, Z) станка мод. МС - 300 на ступенчатое силовое воздействие 500 Н, приложенное к корпусу шпинделя вдоль координаты X, Y, Z.

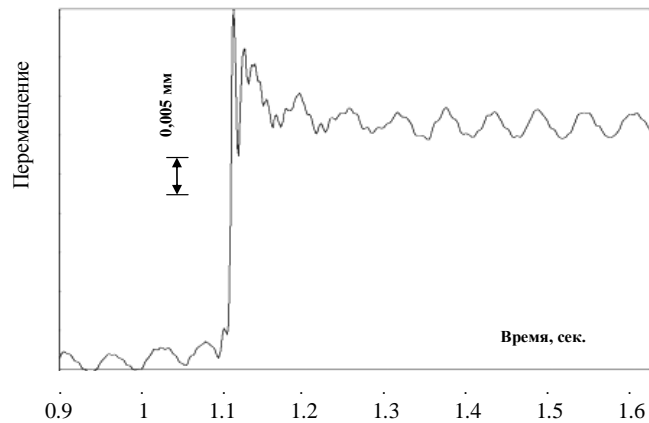


Рис. 7.6. «Отклик» несущей системы $D_x(t)$ координаты X на ступенчатое силовое воздействие 500 Н, приложенное вдоль координаты X

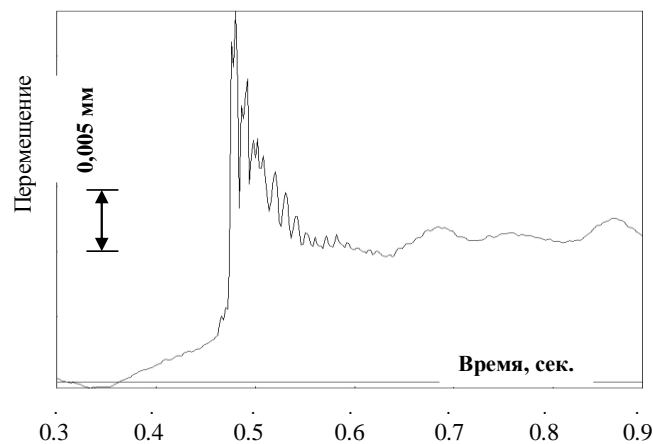


Рис. 7.7. «Отклик» несущей системы $D_y(t)$ координаты Y на ступенчатое силовое воздействие 500 Н, приложенное вдоль координаты Y

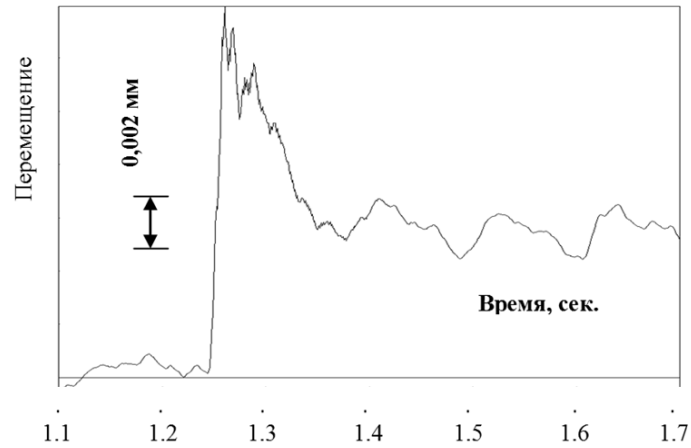


Рис. 7.8. «Отклик» несущей системы $D_z(t)$ координаты Z на ступенчатое силовое воздействие 500 Н , приложенное вдоль координаты Z

При исследовании отклика несущей системы по координате Z было выявлено, что характер поведения кривой отклика существенно зависит от параметров настройки ПИД регулятора. На рис. 7.9, в качестве примера, показан отклик $D_z(t)$, соответствующий настройкам привода, близких к зоне неустойчивости (недостаточное демпфирование, создаваемое ПИД регулятором).

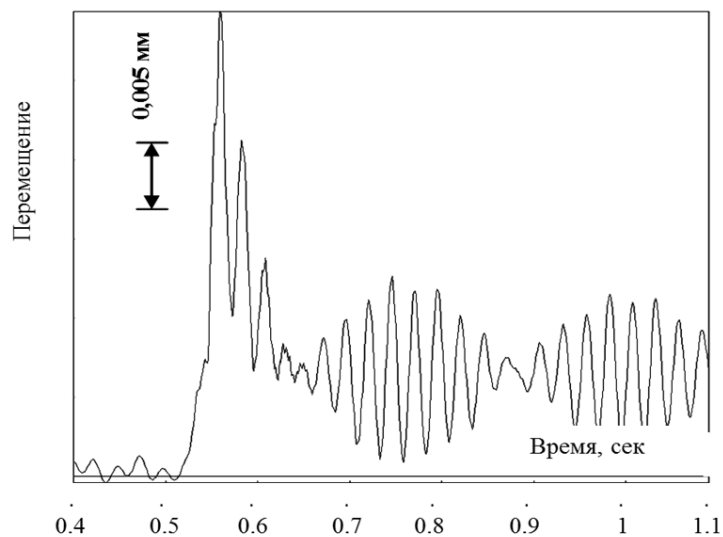


Рис. 7.9. «Отклик» $D_z(t)$ на ступенчатое воздействие 500 Н вдоль Z при настройках привода, близких к зоне неустойчивости

На рис. 7.10 представлена реакция несущей системы станка мод. МС 300 на плече 100 мм относительно оси поворота планшайбы на ступенчатое силовое воздействие 500 Н , приложенное к планшайбе вдоль координаты Y в

соответствии с рис. 7.5. на плече 100 мм относительно оси поворота планшайбы.

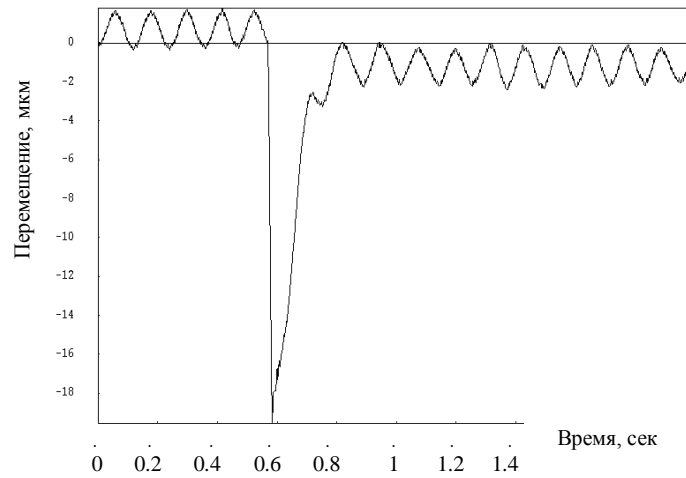


Рис. 7.10. Реакция планшайбы на ступенчатое силовое воздействие

Как мы видим из представленных откликов несущей системы, числовые значения различаются существенно. Следует отметить, что для откликов для несущих систем других машин может существенно меняться сама «картина» временного сигнала (рис. 7.11 - реакция НС станка «Гексамех-1» [21] на ступенчатое силовое воздействие).

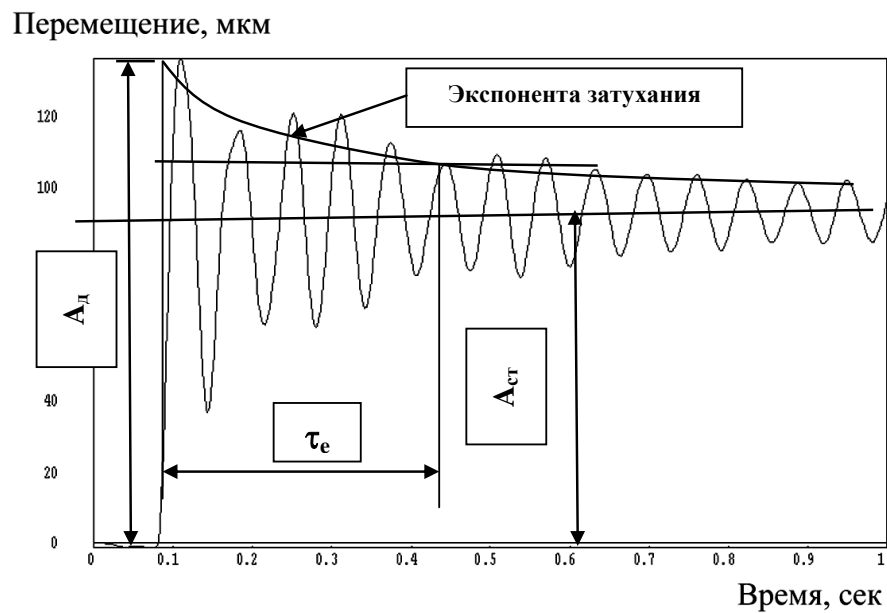


Рис. 7.11. Временной сигнал «перемещение УУ – время» и параметры оценки динамической жесткости несущей системы по реакции на ступенчатое силовое воздействие на примере станка «Гексамех-1»

Для оценки динамических свойств несущей системы многокоординатной машины с позиции влияния силового воздействия на изменение траектории движения исполнительных органов предлагается использовать 4 параметра, определяемые по отклику на силовое ступенчатое воздействие (рис. 7.11):

1. $J_{yy} = 500/A_{cm}$ [Н/мкм] – статическая жесткость,
2. $k_d = A_{дин}/A_{ст}$ – коэффициент динамичности при ступенчатом силовом воздействии – отношение,
3. τ_e – время релаксации – промежуток времени, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в e раз (2,718...),
4. $f_{осн}$ – основная собственная частота переходного процесса.

Сравнивая несущие системы машин по указанным 4 параметрам, можно утверждать, что чем ближе параметр k_d к 1, $\tau \rightarrow 0$, а $J \rightarrow \infty$, тем «выше» динамические свойства системы и тем меньше будет влияние статических и динамических сил на изменение траектории движения ИО машины и выше её динамическая точность. (Основная собственная частота $f_{осн}$ является важным параметром при эксплуатации машины).

Для рассматриваемого случая (рис.7.11) указанные параметры имеют следующие числовые значения: $f_{осн} = 15,9$ Гц; $A_{ст} = 0,095$ мм; $A_{дин} = 0,138$ мм; $\tau_e = 0,338$ сек; $J_{yy} = 500/95 = 5,26$ Н/мкм; $k_d = 138/95 = 1,45$.

В табл. 7.1 сведены данные о динамических свойствах несущей системы станка «Гексамех - 1» и станка мод. МС - 300.

В строке ZZ* приведены параметры отклика НС при приложении ступенчатого воздействия вдоль координаты Z при «неправильной» настройке привода по координате Z (некорректные коэффициенты обратных связей в контурах управления по положению и по скорости, рис. 7.9, а).

Динамические свойства НС станка «Гексамех -1» и станка МС 300

Станок	Координата	Высокая частота f_1 , Гц	Низкая частота f_2 , Гц	J , Н/мкм	k_d	τ_e , сек.
Гексамех-1	УУ	-	15,9	5,26	1,45	0,338
МС - 300	ХХ	98,3	17	15,6	1,52	0,038
	УУ	100	9,78	43,35	2,40	0,050
	ZZ	98,6	8,6; 18; 50	86	1,65	0,060
	ZZ*	38,70-41,99	-	83,11	4,80	0,042
	СС	186	8,47	167	9,72	0,08

Результаты сравнения несущей системы станка «Гексамех - 1» и станка мод. МС - 300.

- динамические свойства несущей системы станка «Гексамех – 1» ниже по всем четырем параметрам по сравнению со станком МС - 300.

- Привод по координате С является статически очень жёстким с хорошими демпфирующими свойствами, но коэффициент динамичности является весьма высоким.

7.1.4. Реакция несущей системы на кинематическое «ступенчатое» воздействие через управляющую программу (режим г.)

Нагружение несущей системы машины осуществляется через привод от управляющей программы. В управляющей программе задаётся перемещение, например, 10 мм с заданной подачей, например, 500 мм/мин, а величина постоянного ускорения устанавливается автоматически с ограничением на максимальное значение. Измерение перемещений проводилось на лазерном интерферометре ML 10 относительно станины. На рис. 7.12 – 7.13 показан процесс разгона при отработке кадра программы «перемещение 10 мм» при подаче $F = 500$ мм/мин и $F = 2000$ мм/мин. На рис. 7.14 - 7.15 аналогично представлен процесс торможения при $F = 500$ мм/мин и $F = 2000$ мм/мин. Наблюдаются характерные затухающие свободные колебания при торможении (перерегулирование – 2 мкм при $F = 500$ мм/мин и 3 мкм при $F = 2000$ мм/мин).

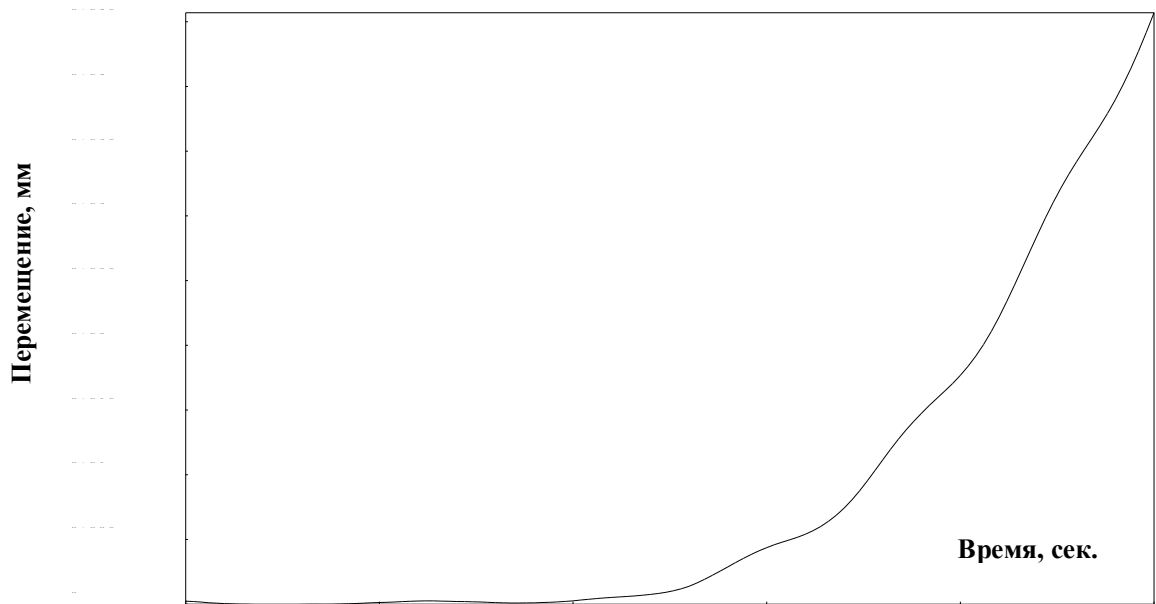


Рис. 7.12. Кривая разгона «перемещение X – время», подача $F = 500$ мм/мин, станок МС – 300 № 6

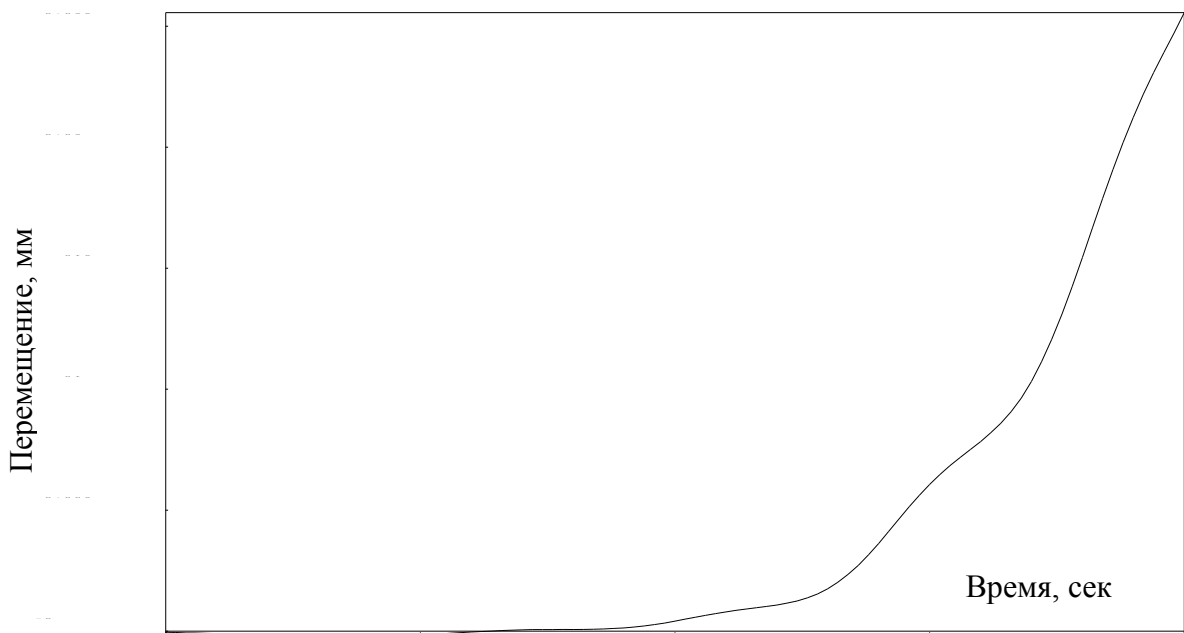


Рис. 7.13. Кривая разгона «перемещение X – время», подача $F = 2000$ мм/мин, станок МС – 300 № 6

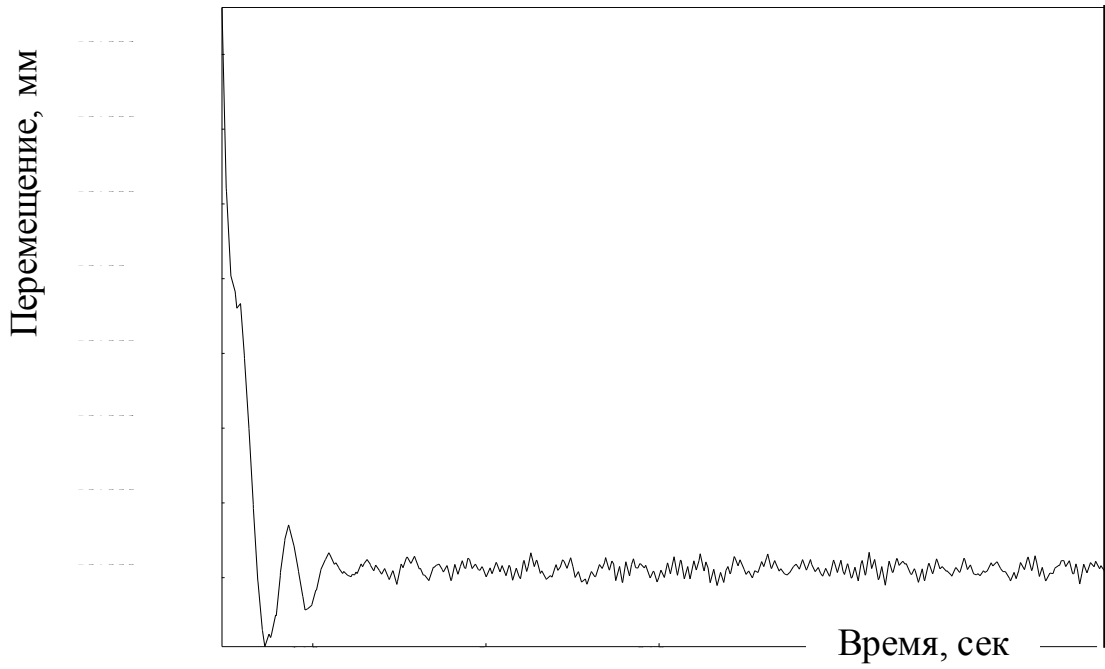


Рис. 7.14. Кривая торможения «перемещение X – время», подача $F = 500$ мм/мин, станок МС – 300, № 6

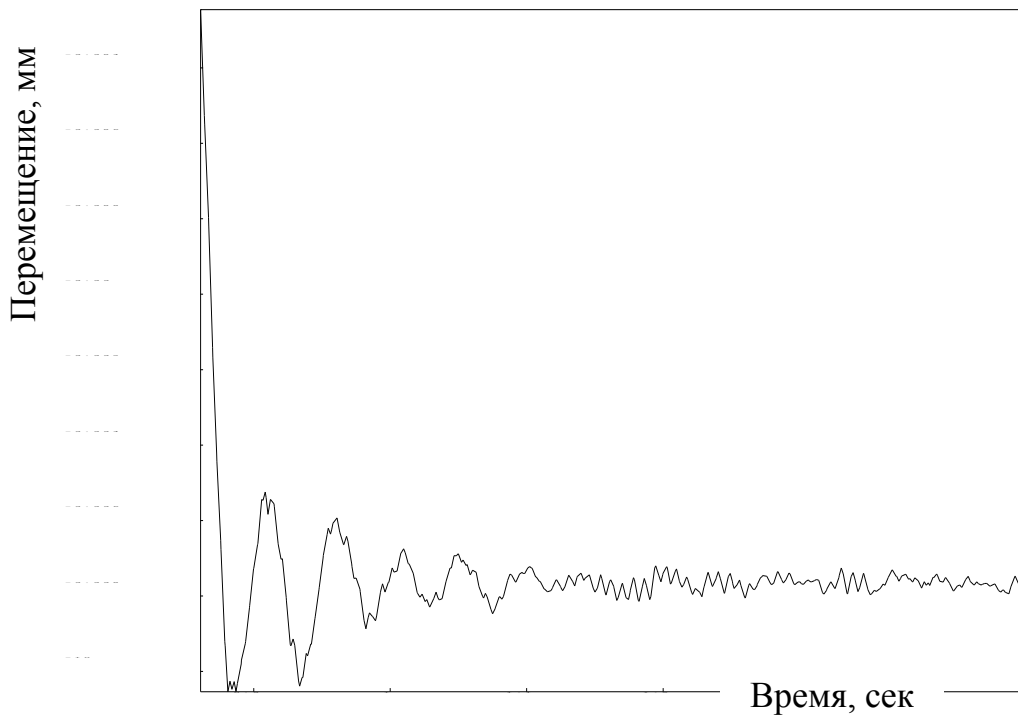


Рис. 7.15. Кривая торможения «перемещение X – время», подача $F = 2000$ мм/мин, станок МС – 300, № 6

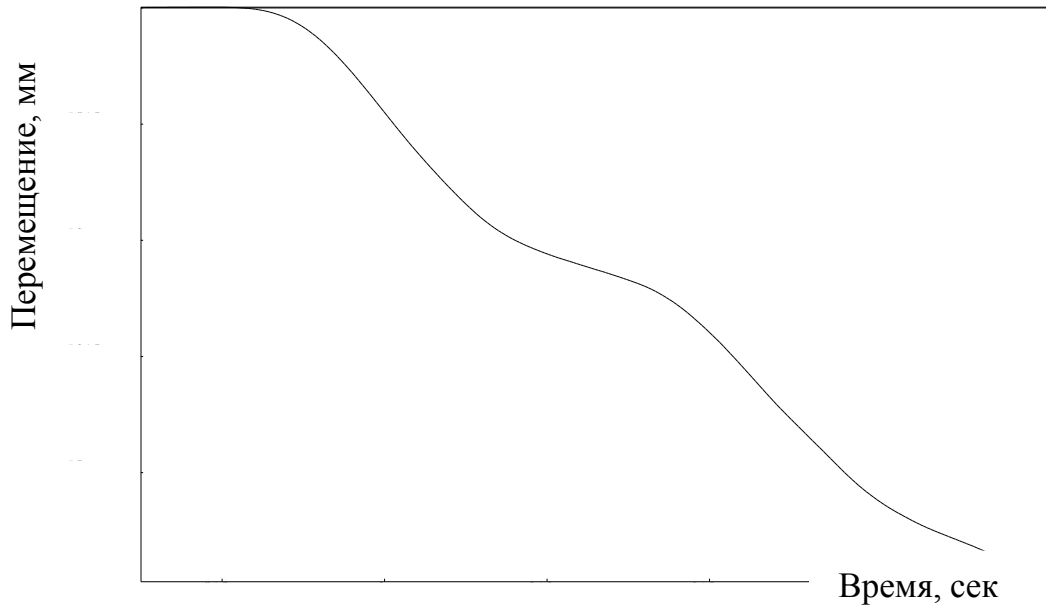


Рис. 7.16. Кривая разгона «перемещение X – время», подача $F = 500$ мм/мин, установка УДФ (ОАО НИИТ)

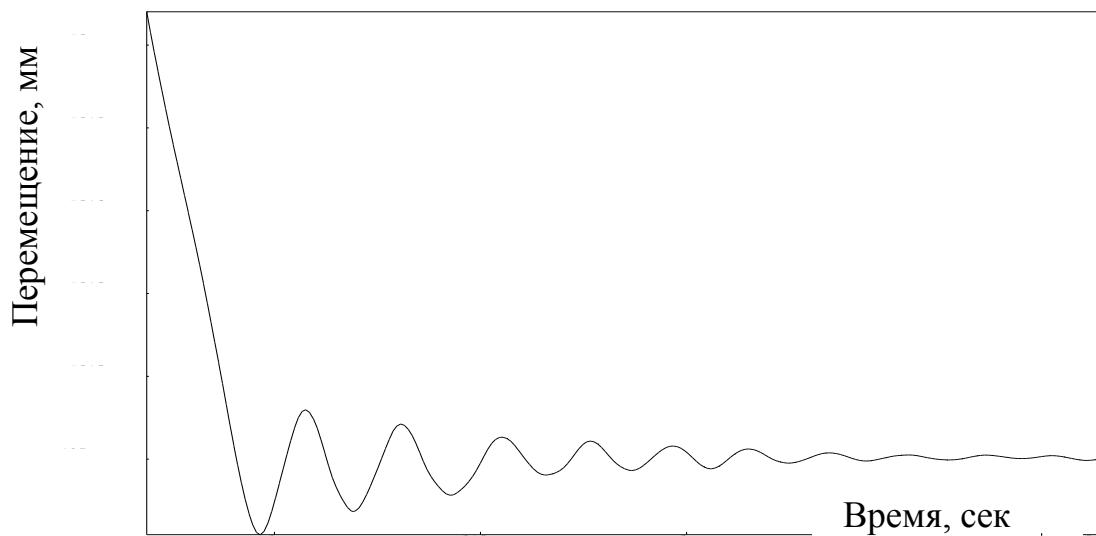


Рис. 7.17. Кривая торможения «перемещение X – время», подача $F = 500$ мм/мин, установка УДФ (ОАО НИИТ)

На рис. 7.16 показан процесс разгона, а на рис. 7.17 процесс торможения при отработке кадра программы «перемещение 10 мм» при подаче 500 мм/мин для технологической дробеструйной установки УДФ, отличающейся большими перемещаемыми по программе массами. Датчики обратных связей

перемещаемых узлов установлены на валах электродвигателей. Перерегулирование при торможении по координате X составило 0,2 мм.

Представленные результаты наглядно характеризуют динамические процессы «разгона – торможения» в несущей системе многокоординатной машины. **По результатам исследования следует сделать вывод:**

1) Хотя настройка приводов идет по критерию отсутствия перерегулирования при разгоне-торможении по сигналу рассогласования в цепи обратной связи по положению, реально на выходном звене (корпус шпинделя) практически наблюдается всегда перерегулирование.

2) Достаточно сложно по кривым разгона-торможения оценить влияние динамических процессов на точность воспроизведения объёмной траектории.

Более информативным с точки зрения анализа влияния динамических процессов на точность воспроизведения траектории является исследование движения ИО машины при воспроизведении эталонной траектории и нулевом силовом воздействии со стороны рабочего процесса (режим д).

7.1.5. Точность воспроизведения заданных типовых траекторий (режим д)

Наиболее развитым и информативным видом динамических испытаний на холостом ходу (режим д) является измерение точности воспроизведения окружности заданного радиуса при различной окружной скорости с использованием измерительных средств, описанных в разделе 5.2.1.1.2.

На рис. 7.18 представлены отклонения воспроизведения окружности радиусом 100 мм при различной контурной скорости для станка МС – 300 (датчик обратной связи установлен на подвижном узле), полученные с помощью прибора ballbar ф Renishaw. Здесь мы наблюдаем наличие всплесков динамической ошибки при реверсе по каждой линейной координате (скорость движения «проходит» через ноль). Величина всплесков увеличивается с увеличением контурной скорости с 3,5 мкм до 6,3 мкм при увеличении контурной подачи с 500 мм/мин до 2000 мм/мин. Аналогично наблюдается уве-

личение амплитуды «дребезга» (наложение высокочастотной составляющей на геометрические отклонения).

На рис. 7.19 представлена динамическая ошибка рассогласования в контуре управления по положению, которая выводится на дисплей системы управления станком 840 D. Здесь мы видим очень хорошее совпадение величины всплеска $\approx 6,3$ мкм и динамической ошибки $\approx 5,8$ мкм.

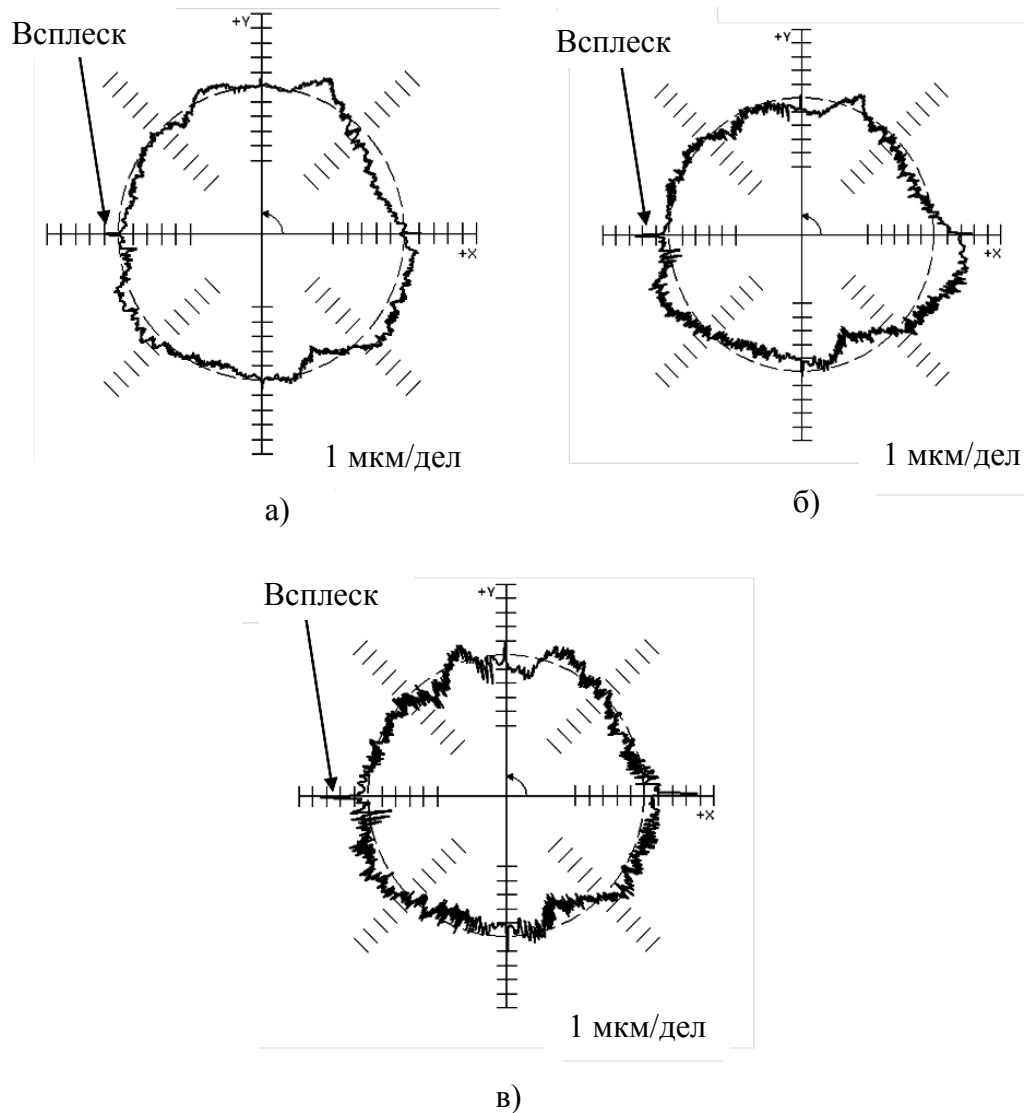


Рис. 7.18. Отклонения воспроизведения окружности $R 100$ мм на станке МС - 300 (№2) при различной контурной подаче: а) $F = 500$ мм/мин, некруглость – 3,5 мкм, б) 1000 мм/мин, некруглость – 5,5 мкм, в) 2000 мм/мин, некруглость – 6,3 мкм

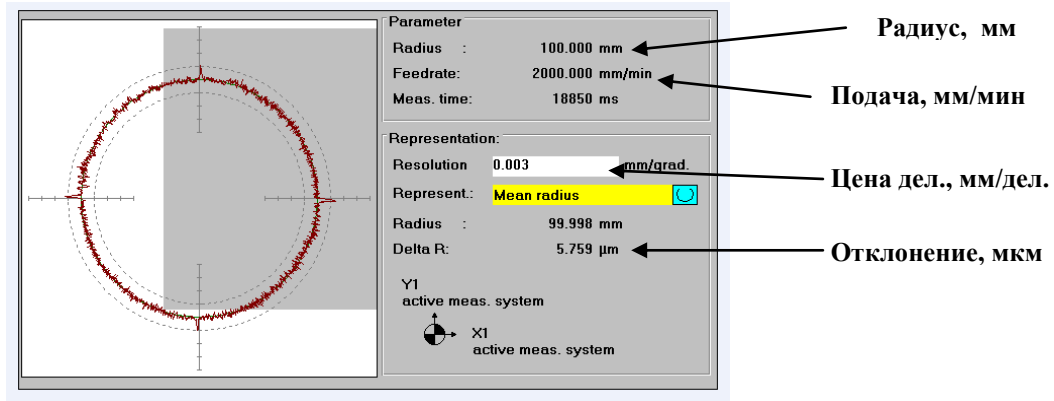


Рис. 7.19. Динамическая ошибка воспроизведения окружности $R\ 100$ мм на контурной скорости 2000 мм/мин

На рис. 7.20 представлены отклонения воспроизведения окружности радиусом 100 мм при различной контурной скорости для модернизированного тяжёлого продольно-фрезерного станка ФП 27 (Савёловский машзавод) облегчённой конструкции с направляющими качения датчик обратной связи установлен на валу электродвигателя). Здесь мы видим, что не происходит увеличения всплеска при реверсе подачи, а увеличивается дребезг (высокочастотные колебания), накладывающийся на геометрические отклонения.

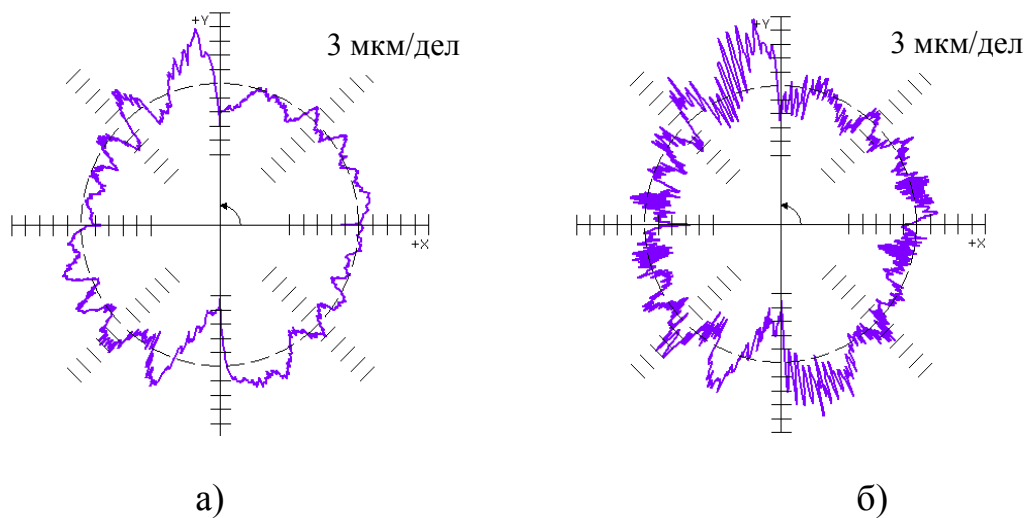


Рис. 7.20. Отклонения воспроизведения окружности $R\ 100$ мм на станке ФП 27облегчённой конструкции с направляющими качения при различной контурной подаче: а) $F = 500$ мм/мин, б) 5000 мм/мин

На рис. 7.21 представлены отклонения воспроизведения окружности радиусом 100 мм при различной контурной скорости для немодернизированного тяжёлого продольно-фрезерного станка ФП 27 с направляющими скольжения (фторопласт) (датчик обратной связи установлен на валу электродвигателя). Здесь мы видим, что происходит увеличение величины всплеска при реверсе подачи на всём диапазоне подач. Величина дребезга растёт при увеличении подачи с 500 мм/мин до 5000 мм/мин, а с 5000 мм/мин до 10000 мм/мин не изменяется.

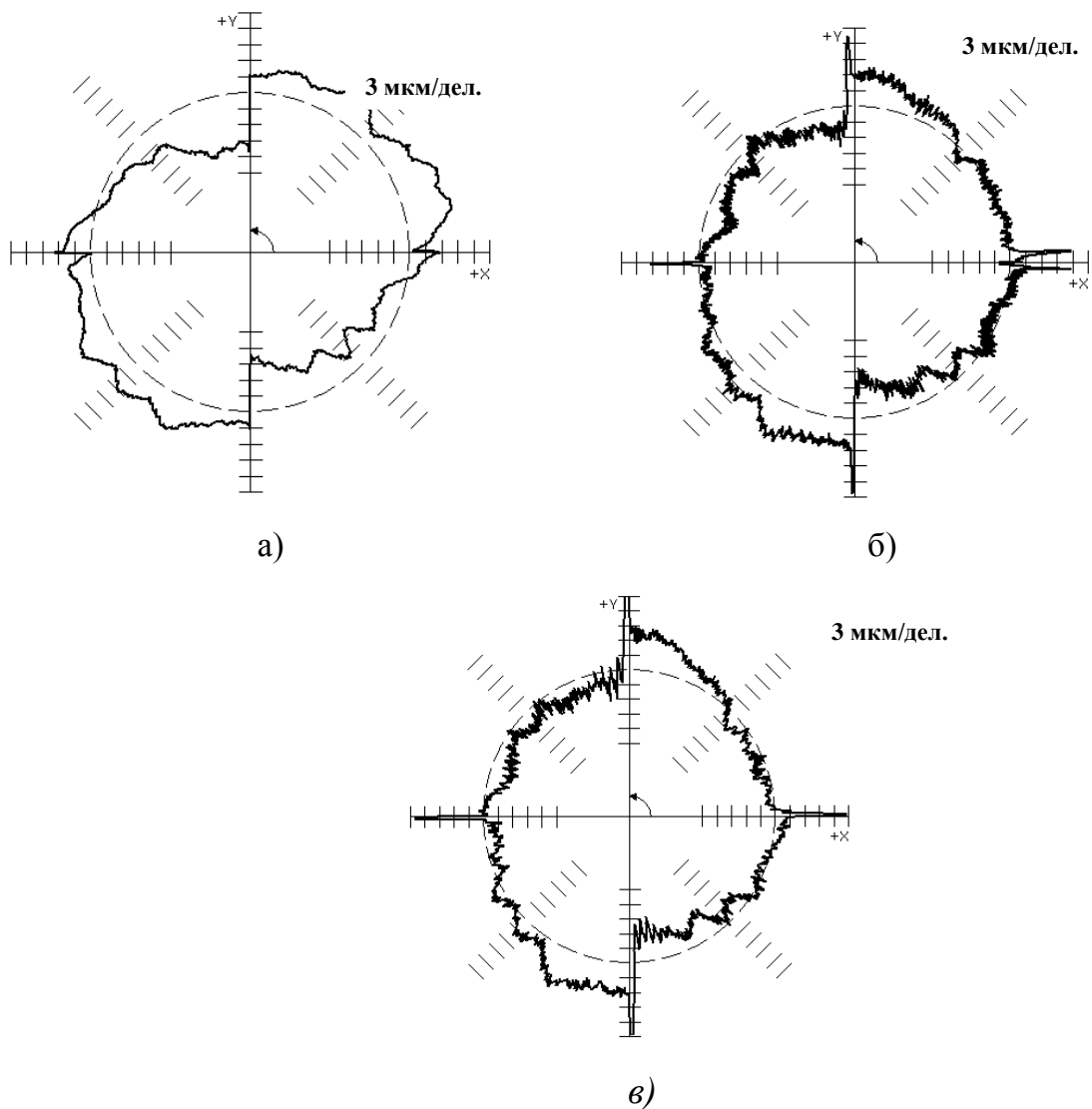


Рис. 7.21. Отклонения воспроизведения окружности $R\ 100\ \text{мм}$ на станке ФП 27 обычной конструкции с направляющими скольжения при различной контурной подаче: а) $F = 500\ \text{мм/мин}$, б) $5000\ \text{мм/мин}$, в) $10000\ \text{мм/мин}$

На рис. 7.22 представлены отклонения воспроизведения окружности радиусом 150 мм при различной контурной скорости для продольно-фрезерного станка FS80 – GA2 (Чехия) с направляющими качения (датчик обратной связи установлен на подвижном узле). Здесь мы видим, что всплески при реверсе подачи направлены внутрь окружности. Это говорит о том, что внесена «коррекция на всплеск» с перерегулированием. При увеличении подачи величина всплеска не увеличивается, а по координате X уменьшается. Величина дребезга растёт при увеличении подачи.

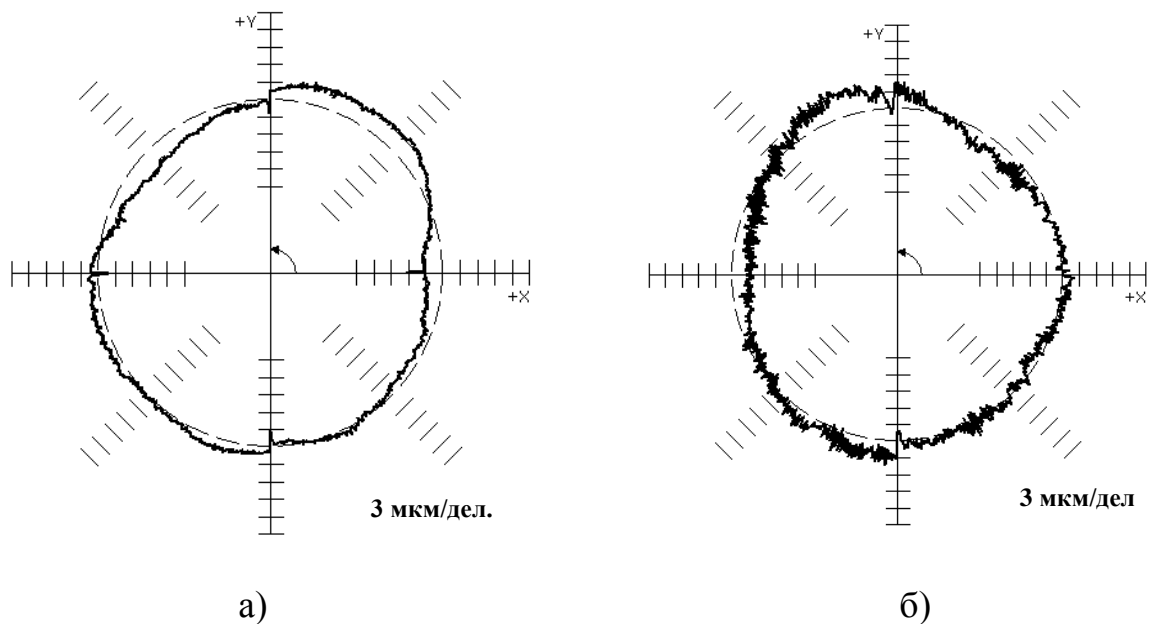


Рис. 7.22. Отклонения воспроизведения окружности R 150 мм на станке FS80 – GA2 (Чехия): а) $F = 1000$ мм/мин, б) 4000 мм/мин

На рис. 7.23 представлены отклонения воспроизведения окружности радиусом 150 мм при различной контурной скорости для высокоскоростного тяжёлого продольно-фрезерного станка ВСФП-1 (ОАО НИАТ) с вертикально расположенным неподвижным столом и траверсой с синхронным приводом (master-slave). В станке применены направляющие качения (танкетки) и датчики обратной связи в приводах, установленные на валах электродвигателей.

Здесь мы видим, что при увеличении контурной скорости с 500 мм/мин до 2000 мм/мин изменений в кривой отклонений не наблюдается (рис. 7.22 а)

и б)). Всплески при реверсе подачи на фоне таких больших первичных отклонений не проявляются. При увеличении подачи до 5000 мм/мин мы наблюдаем явное проявление несогласованности коэффициентов усиления в контуре управления по положению в приводах по координатам X и Y. Об этом свидетельствует «симметричное» положение круглограмм на рис. 7.23 в) и на рис. 7.23 г). Величина дребезга не изменяется на всем диапазоне ($F = 500 \div 5000$ мм/мин).

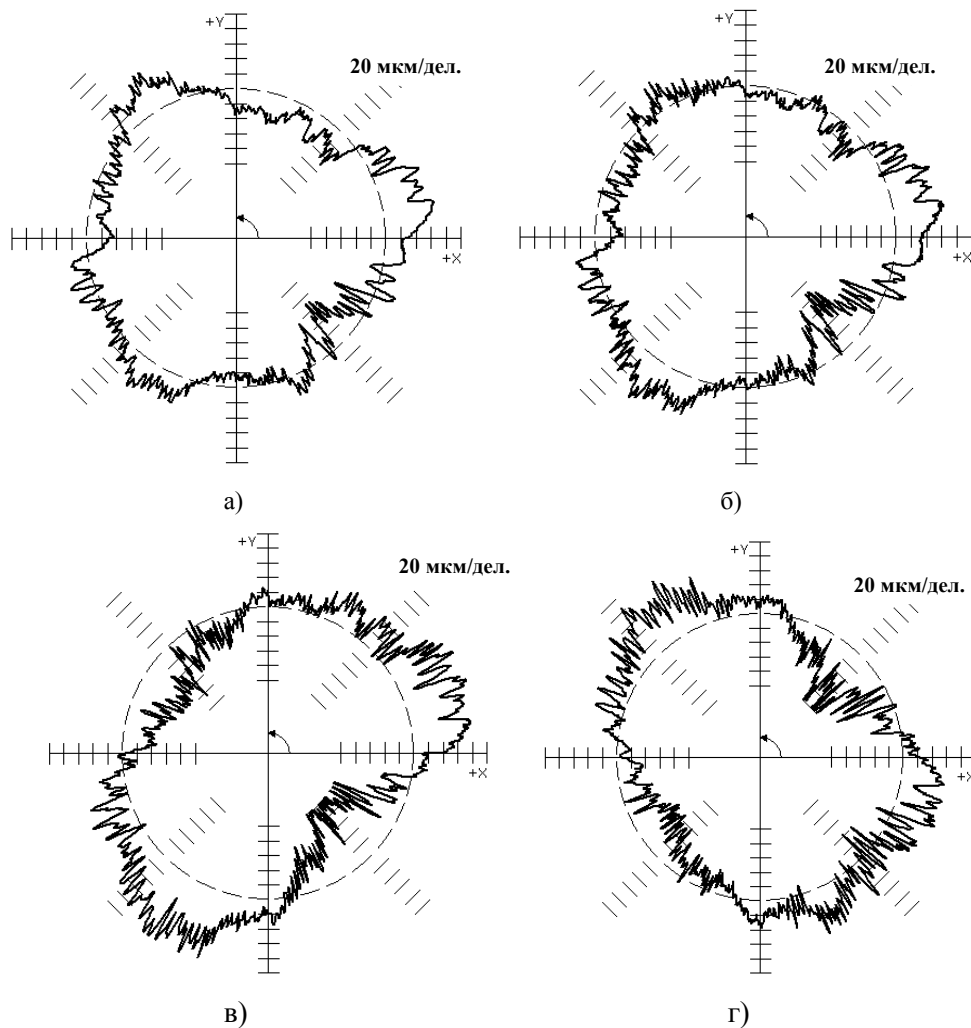


Рис. 7.23. Отклонения воспроизведения окружности $R 150$ мм на станке ВСФП-1 с направляющими качения при различной контурной подаче: а) $F = 500$ мм/мин, б) 2000 мм/мин, в) 5000 мм/мин (движение по часовой стрелке), г), в) 5000 мм/мин (движение против часовой стрелки)

При воспроизведении окружности в многокоординатных машинах с ЧПУ параллельной структуры наблюдаются интересные динамические эффекты. На рис. 7.24 представлены отклонения воспроизведения окружности радиусом 150 мм при контурной скорости 500 мм/мин для высокоскоростного станка «Гексамех-1» (ОАО НИАТ) гибридной структуры. Сравнивая круглограммы рис. 7.24 а) и рис. 7.24 б), мы видим, что расположение всплесков при реверсе подачи на траектории «окружность» совершенно различное. При формировании траектории за счет движения стола вдоль координаты X и движения платформы Гауфа – Стюарта по координате Y (рис. 7.24 а) наблюдается расположение всплесков как в традиционных станках последовательной структуры, хотя в движении платформы Гауфа – Стюарта участвуют все шесть приводов. При формировании траектории «окружность» за счет движения платформы Гауфа – Стюарта расположение всплесков при реверсе подачи в приводах совершенно другое, чем в традиционных станках последовательной структуры, а именно, близко к положению приводов платформы в конструкции станка. В станке применены приводы, в которых датчики обратной связи установлены на валах электродвигателей.

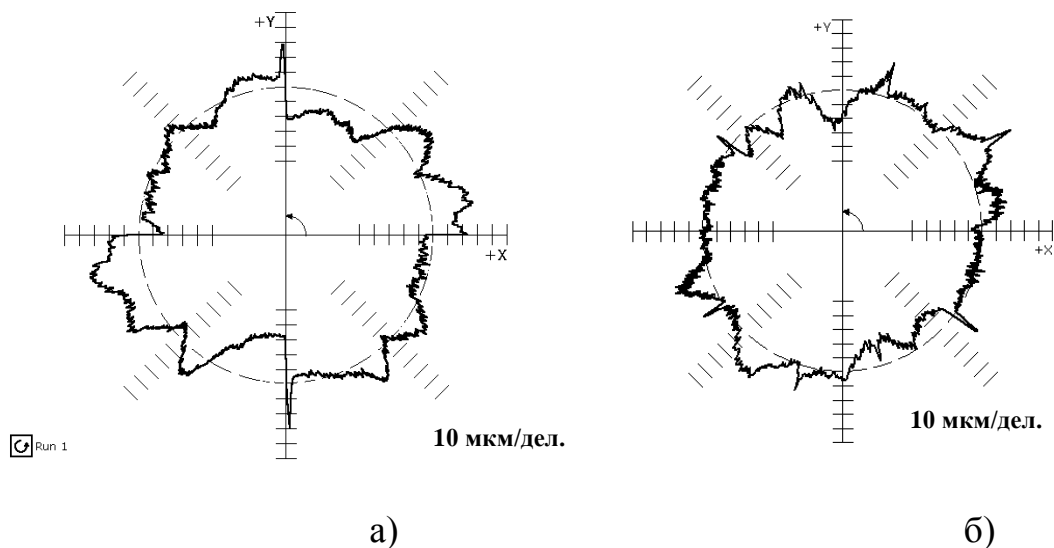


Рис. 7.24. Отклонения воспроизведения окружности R 150 мм на станке «Гексамех-1»: а) траектория «окружность» образуется движением стола вдоль координаты X и движением платформы Гауфа – Стюарта по координате Y, б) траектория «окружность» образуется движением платформы Гауфа – Стюарта по координатам X и Y

Использование измерительных приборов типа KGM 181 and KGM 182 Grid Encoders ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH [173] позволяет проводить динамические испытания на холостом ходу (режим д) при воспроизведении более сложных плоских траекторий. Например, обход прямого угла. При таких испытаниях удаётся исследовать влияние переходных процессов динамики при «разгоне-торможении» на отклонения от заданной траектории [156].

В работе [129] представлены результаты экспериментальных исследований влияния динамических процессов на точность воспроизведения пространственной траектории, формируемой движением всех пяти приводов (3 линейных и 2 угловых). Исследования проводились на 5 координатном станке (рис. 7.25) мод. Huron K2X 8 Five ф. Fortron UK Ltd., класс точности которого близок к классу точности станка MC – 300.

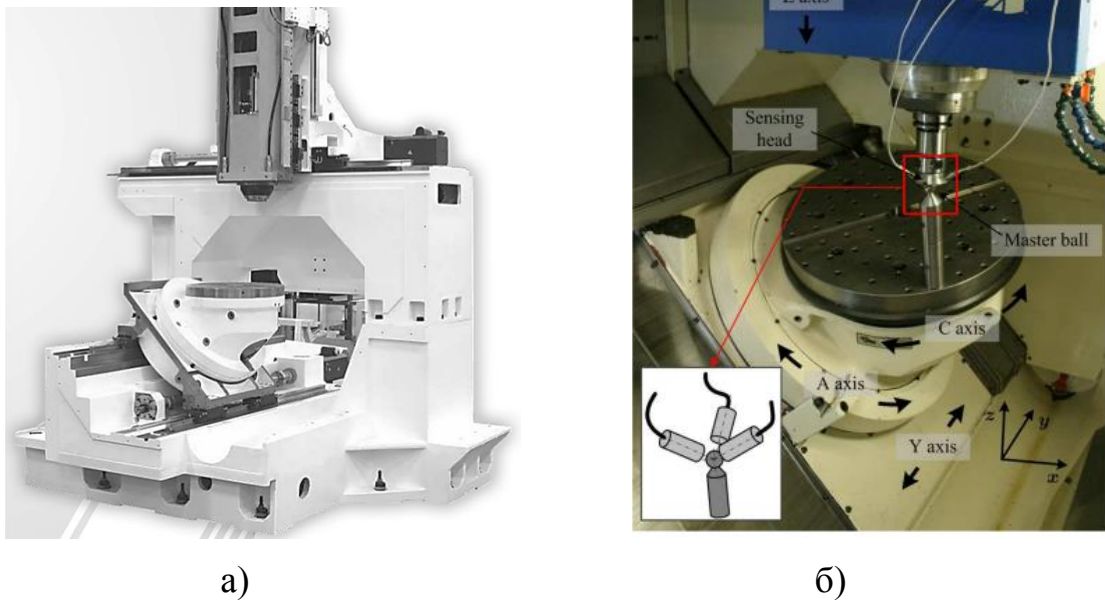
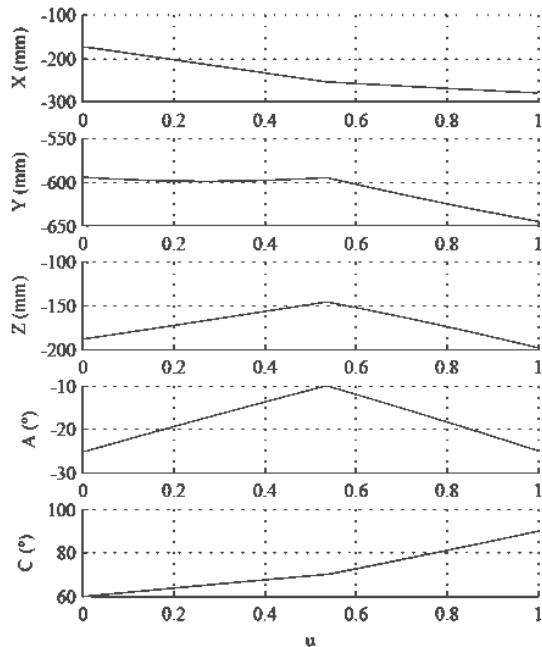


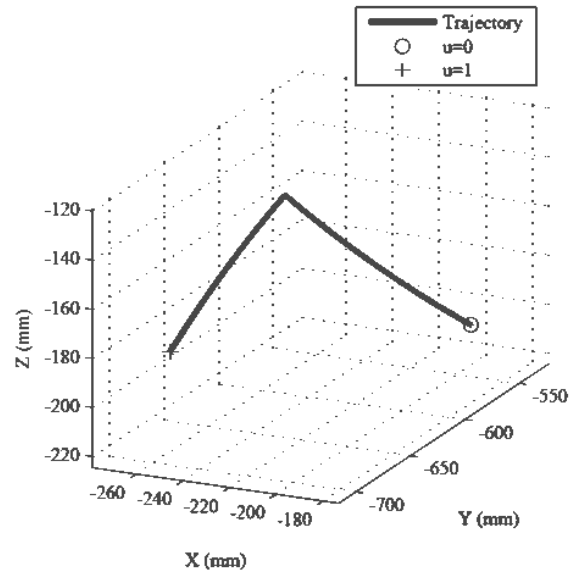
Рис. 7.25. Станок Huron K2X 8 Five: а) Общий вид, б) измерительная аппаратура

На рис. 7.26 показана траектория движения шпинделя с датчиками относительно образцового шара, установленного на планшайбе. На рис. 7.26 а)

показаны перемещения по линейным и угловым координатам в функции длины траектории u , а на рис. 7.26 б) представлена траектория в рабочем пространстве станка.



а)



б)

Рис. 7.26. Траектория движения корпуса датчиков отклонения относительно образцового шара, установленного на планшайбе

В табл. 7.2 представлен баланс точности воспроизведения траектории (рис. 7.26, б).

Табл. 7.2

Подача, мм/мин	Динамическая ошибка приводов, %	Первичные отклонения, %	Отклонения движения, %	Отклонения темпер. деформаций, %	Отклонения сил. деформаций, не охвач. об. св., %
1000	1,1	86,9	11,4	0,0	0,6
1800	1,7	85,9	11,3	0,4	0,7
3240	2,4	84,7	11,1	0,9	0,9
5832	3,9	82,6	10,8	1,1	1,5
10498	6,5	77,7	10,2	2,3	3,3
18896	9,5	72,8	9,5	3,3	4,8

Выводы.

1) Влияние динамики на точность воспроизведения траектории движения ИО многокоординатной машины с ЧПУ разнообразно.

2) Необходимо развитие методов моделирования точности воспроизведения пространственной траектории ИО машины на основе разработанной блок-схемы (рис. 7.2) и представленного систематизированного экспериментального материала по испытаниям многокоординатных станков с ЧПУ на холостом ходу.

3) Собранный систематизированный экспериментальный материал по испытаниям на холостом ходу является основой для анализа точностных возможностей многокоординатных машин при повышенных динамических режимах работы и синтеза конструктивных схем машин повышенной динамической точности.

7.1.6. Влияние сил резания на точность воспроизведения заданной траектории (режим e)

Влияние квазистатической составляющей инерционных, кориолисовых сил и сил резания на точность воспроизведения заданной траектории в настоящее время оценивается, в основном, двумя способами: 1) с помощью интегральной статической жесткости несущей системы машины, 2) обработкой деталей-образцов.

Введение. Жёсткость машины – это её способность сопротивляться деформациям одних звеньев относительно других при приложении между ними нагружающей силы (например, между шпинделем и рабочим столом станка).

Впервые, подробно жесткость машины (станка) была исследована в работе [25]. В работе [116] тщательно и систематически исследуется влияние жесткости станка на точность обработки. В [9] проф., д.т.н. Балакшин Б.С. раскрывает понятие «жесткости» станка так:

- жесткость - это одна из важных характеристик физического состояния станка,
- жесткость всегда положительное число,
- жесткость есть отношение приращения перемещения к приращению силы, в направлении которой измеряется перемещение.

В работах [9, 29, 122] развивается понятие жесткости, данное проф. Балакшиным Б.С, а именно, жесткость рассматривается как векторная величина, т.е. рассматриваются (учитываются) перемещения в направлении перпендикулярном к направлению действия нагружающей силы. Последнее имеет большое значение для исследования влияния колебаний в НС станка на «вибрационный след», остающийся на обработанной поверхности.

В табл. 7.3. представлены значения статической жесткости НС некоторых образцов станков [22, 104]. Следует отметить, что опубликованных экспериментальных данных по статической жесткости многокоординатных машин в нашей стране и за рубежом не так много.

Табл. 7.3

Жесткость НС некоторых образцов станков.

Станок	Жесткость, Н/мкм			
	Шпиндель – стол		Платформа – стол	
	j_{xx}/j_{yy}	j_{zz}	j_{xx}/j_{yy}	j_{zz}
Опытный станок – гексапод [7]	$j_{xx}=14/j_{yy}= 15$	$j_{zz}= 37,5$	$j_{xx}=28/j_{yy}= 30$	$j_{zz}= 60$
Гексамех-1 [22]	$j_{xx}=5/j_{yy}= 5$	$j_{zz}= 15,5$	$j_{xx}=5/j_{yy}= 5$	$j_{zz}= 15,5$
Многоцелевой станок фрезерно-расточной группы мод. ИР320ПМФ4 [11]	$j_{xx}=10/j_{yy}= 14,3$	$j_{zz}= 25$	-	-
Одностоечный координатно-расточной станок с площадью стола 630x1000 мм [53]	$j_{xx} =24,4/j_{yy} = 28,8$	$j_{zz}= 58,8$	-	-
Консольно-фрезерный станок [28]	$j_{yy} = 21,7$	-	-	-
Вертикальный фрезерный станок с крестовым столом ГОСТ 9726-89	$j_{yy}= 27,83$	$j_{zz}= 22,2$	-	-
Продольно-фрезерный станок	$j_{yy}= 463.9$	$j_{zz}= 349.6$	-	-

ГОСТ 18101-85				
Многоцелевой 3-х координатный станок мод. TRIJOINT ф. KovoSvit MAS, Inc (Чехия) [177]	$j_{yy} = 120$	$j_{zz} = 120$	-	-
Многоцелевой 4-х и 5-ти координатный станок мод. DHP 50 DHP 80 ф. Mori Seiki International SA (Япония и Швейцария) (DIXI machines). [130]	$j_{xx} = 120 /$ $j_{yy} = 120$	$j_{zz} = 120$	-	-
5 координатный станок с ЧПУ мод. MC 300	$j_{xx} = 12.5 /$ $j_{yy} = 25$	$j_{zz} = 75$	-	-

Из табл. 7.3 можно сделать выводы:

- средняя жесткость для многоцелевых станков 40 Н/мкм,
- хорошая жесткость для многоцелевых станков - это 120 Н/мкм,
- станки с параллельной структурой с большим числом звеньев обладают недостаточной жесткостью,
- продольно-фрезерные станки портальной конструкции в настоящее время обладают наибольшей жесткостью 464 Н/мкм.

7.1.6.1. Методика измерения статической жесткости

Будем считать интегральной жесткостью машины отношение перемещений (деформаций) между исполнительными органами машины и силой, прикладываемой к ним.

Для станка - это отношение перемещений (деформаций) шпинделя относительно рабочей поверхности стола к прикладываемой нагрузке между ними.

При измерении перемещений шпинделя относительно рабочей поверхности стола в функции нагрузки, прикладываемой между шпинделем и столом, исследователями было замечено, что кривые «перемещение-нагрузка» имеют вид гистерезисной петли [25, 111, 9, 175]. В качестве примера, на рис. 7.27, а) представлена схема проводимых измерений, а на рис.

7.27, б) представлена зависимость перемещений шпинделя относительно рабочей поверхности стола от прикладываемой нагрузки [175].

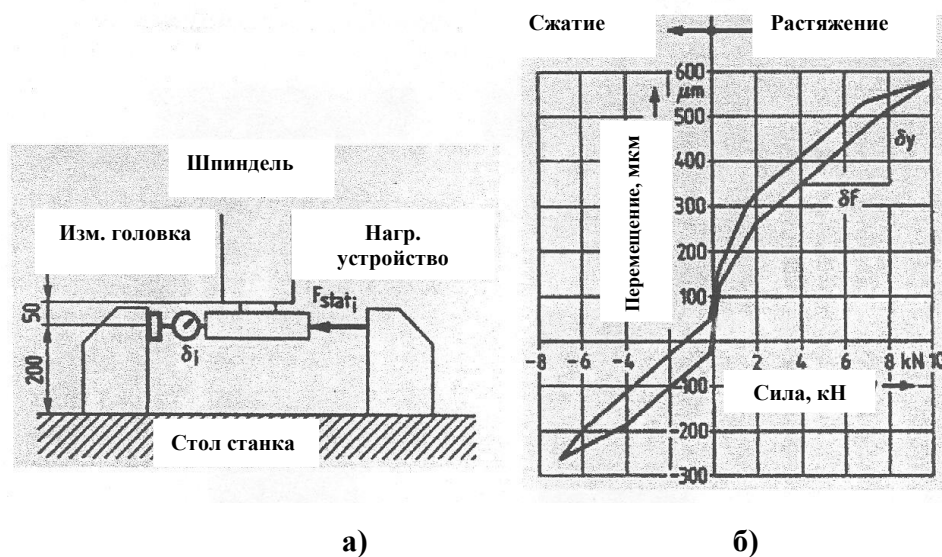


Рис. 7.27. Петля гистерезиса «перемещение – нагрузка»: а) схема измерений, б) кривая перемещений шпинделя относительно рабочей поверхности стола в функции прикладываемой нагрузки.

В качестве средства измерения прикладываемой (нагружающей) силы обычно используются механические динамометры сжатия или растяжения мод. ДОСМ-3, ДОРМ-3, которые по своему классу точности соответствуют задачам измерения статической жесткости широкого класса машин. При использовании указанных средств измерения не удастся с одной установки измерить жесткость при сжимающих и растягивающих усилиях и получить петлю гистерезиса.

На рис. 7.28 представлено устройство измерения статической жесткости, созданное [103] на базе датчика силы сжатия-растяжения с цифровым отсчетным устройством мод. UU ф. DACELL. CO (Korea).

Используемый динамометр имеет следующие технические характеристики:

- | | |
|--|-------------|
| - номинальный диапазон измеряемой силы | 0-5000 Н |
| - дискретность отсчета | 1 Н |
| - нелинейность | 0,03% |
| - температурный диапазон | -10...+70°C |

- допустимая перегрузка 150%
- габариты датчика силы UU 70x62x25 мм
- габариты показывающего прибора DN10 72x72x111мм
- напряжение питания, мощность ~ 220В, 110W



Рис. 7.28. Общий вид устройства измерения статической жесткости (податливости) несущей системы машины

С помощью описанного устройства была получена характеристика статической жесткости в виде петли гистерезиса (рис. 7.29) при нагружении и разгрузке станочного кронштейна – приспособления для крепления обрабатываемой детали на рабочем столе станка «Гексамех-1».

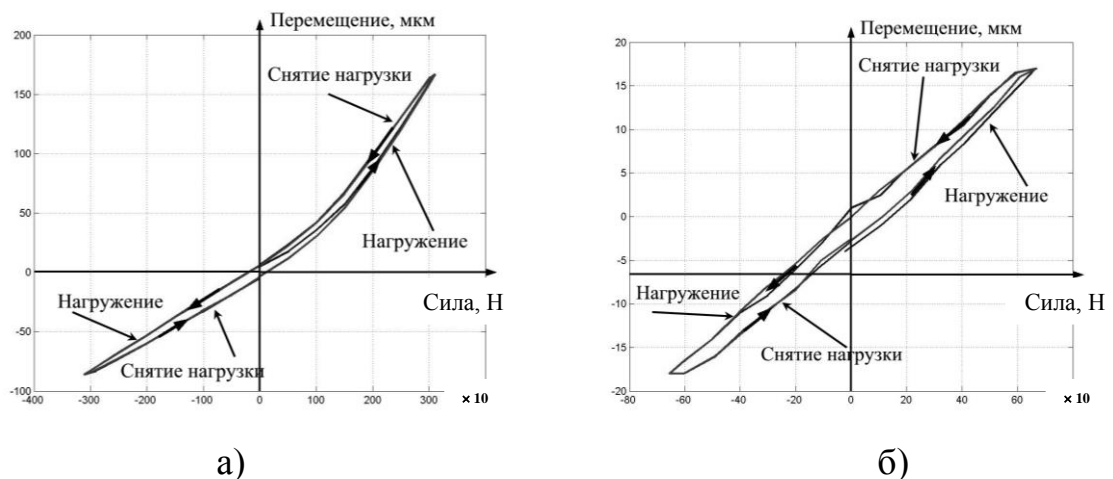


Рис. 7.29. Характеристика статической жесткости станочного кронштейна – приспособления: а) при диапазоне нагружающей силы $-3000 \div 3000$ Н, б) при диапазоне $-600 \div 600$ Н

При исследовании статической жесткости станка МС 300 [104, 113] для измерения деформаций (перемещений) корпуса шпинделя относительно планшайбы использовались три индуктивных датчика «микрон 02», устанавливаемых в направлении линейных координат X, Y, Z, а при измерении статической крутильной жесткости планшайбы относительно станины использовался лазерный интерферометр. На рис. 7.30 представлена схема нагружения несущей системы станка МС 300 и схема измерений деформаций (относительных перемещений шпиндель-планшайба).

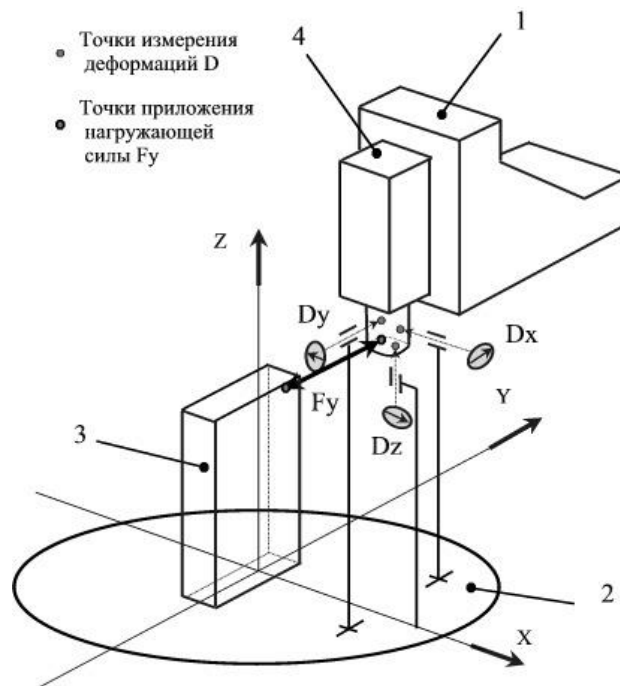


Рис. 7.30. Схема нагружения несущей системы станка МС 300 и схема измерений деформаций

Здесь: 1 – стойка, 2 – планшайба, 3 - кронштейн, устанавливаемый на планшайбе, 4 – шпиндельная бабка. Домкратом через датчик силы создается сила F_y , нагружающая несущую систему станка в направлении оси Y. Деформации D_x , D_y , D_z корпуса шпинделя относительно зеркала планшайбы измеряются с помощью индуктивных датчиков Микрон 02.

Суммарная статическая жесткость J_{ik} по линейным координатам определяется как отношение силы F , действующей в направлении оси i , к деформации D в направлении оси k в точке, принадлежащей присоединительной поверхности конуса шпинделя или близко к ней расположенной:

$$J_{ik} = F_i/D_k \text{ [Н/мкм]}.$$

Крутильная жесткость планшайбы J_{cc} относительно станины, с целью её сопоставления с жесткостью по линейным координатам, определялась как отношение деформации в точке на зеркале планшайбы к силе, действующей в плоскости планшайбы. Точка измерения деформаций располагалась на радиусе 100 мм от оси вращения планшайбы, а направление измерений перемещения совпадало с касательной к окружности. Сила нагружения прикладывалась к планшайбе в плоскости её зеркала на плече 100 мм относительно оси вращения планшайбы.

7.1.6.2. Результаты исследования статической жесткости станка мод. МС - 300

Линейные координаты.

На рис. 7.31 представлены экспериментальные кривые статической суммарной жесткости (планшайба – корпус шпинделя) несущей системы при нагружении вдоль оси X (показаны результаты трёх прогонов (нагружение - разгрузке) измерений).

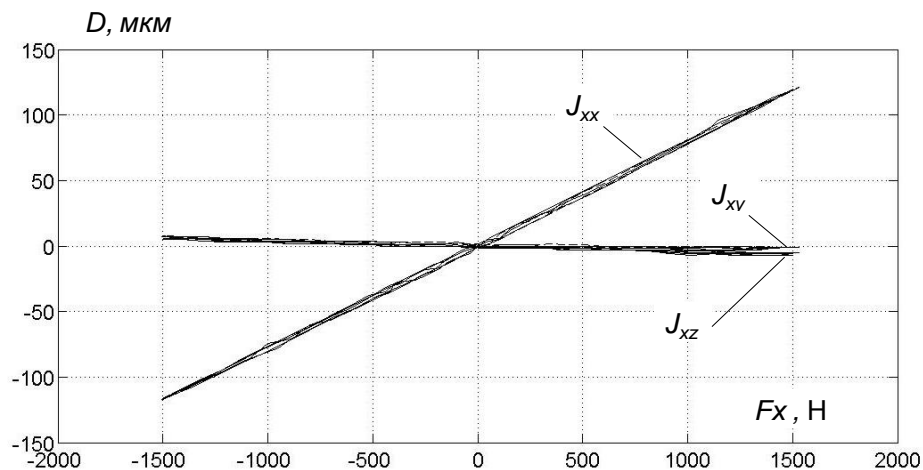


Рис. 7.31. Кривые статической жесткости при нагружении вдоль оси X .

При нагружении по координате Y поведение статической жесткости аналогично статической жесткости, как при нагружении по координате X .

Экспериментальные кривые статической жесткости J_{zz} , J_{zx} , J_{zy} несущей системы при нагружении вдоль оси Z представлены на рис. 7.32

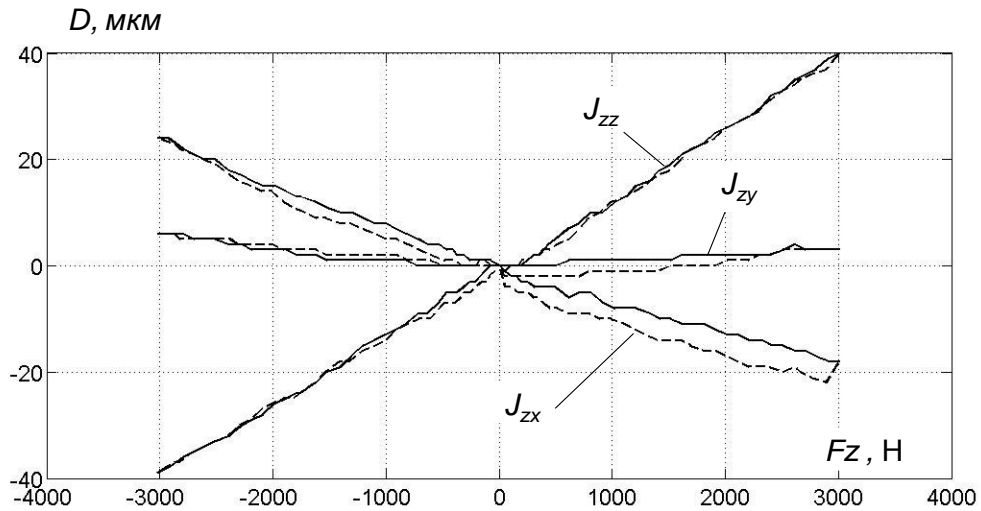


Рис. 7.32. Кривые статической жесткости при нагружении вдоль оси Z : сплошная линия — нагружение, пунктирная — разгрузка.

Статическая жесткость для линейных координат представлена в табл. 7.4

Табл. 7.4

Статическая жесткость станка мод. МС 300 при нагружении вдоль осей X , Y , Z (положение планшайбы горизонтальное)

Нагружающая сила F	Суммарная жёсткость, Н/мкм		
	X	Y	Z
F_x	$J_{xx} = 12.5$	$J_{xy} > 500$	$J_{xz} > 500$
F_y	$J_{yx} > 500$	$J_{yy} = 25$	$J_{yz} > 500$
F_z	$J_{zx} = 136$	$J_{zy} > 500$	$J_{zz} = 75$

По результатам измерения суммарной статической жесткости в направлении линейных координат можно сделать следующие выводы.

Нагружение вдоль осей X и Y .

1) Практически отсутствуют петли гистерезиса при нагружении вдоль осей X и Y (рис. 7.30). Это говорит о хорошем качестве комплектующих и хо-

рошей сборке (отсутствии зазоров в стыках и пластических деформаций в контактах, не охваченных обратными связями).

2) Наблюдается недостаточная статическая жесткость в направлении действия нагружающей силы ($J_{xx} = 12.5$ Н/мкм, $J_{yy} = 25$ Н/мкм).

3) Практически отсутствует взаимовлияние (деформации, перпендикулярные направлению действия силы) (J_{xy} , J_{xz} , J_{yx} и $J_{yz} > 500$ Н/мкм).

Нагружение вдоль координаты Z.

1) Наблюдается сравнительно высокая статическая жёсткость в направлении действия нагружающей силы ($J_{zz} = 75$ Н/мкм).

2) Наблюдается наличие взаимовлияния между действием силы F_z и перемещениями в направлении X ($J_{zx} = 136$ Н/мкм). Это, возможно, является особенностью конструкции (несимметричность и отсутствие разгрузки от веса шпиндельной бабки, т.к. шпиндельная бабка «висит» на ШВП).

3) Наблюдается петля гистерезиса жесткости $J_{zx} = 136$ Н/мкм. Это может быть вызвано несимметричностью конструкции и отсутствием разгрузки от веса шпиндельной бабки.

Угловая координата C. Для исследования статической крутильной жесткости поворотного стола (планшайбы) использовалась та же самая нагружающая аппаратура, что и при исследовании суммарной статической жесткости при нагружении вдоль линейных координат. В качестве датчика линейных перемещений вместо индуктивных датчиков «микрон 02» использовался лазерный интерферометр ML 10.

Экспериментальные кривые статической крутильной жесткости J_{cc} представлены на рис. 7.33.

Статическая жёсткость планшайбы составляет $J_{cc} = 153$ Н/мкм. Это говорит о высокой крутильной статической жёсткости и отсутствии геометрических и упругопластических зазоров. При этом можно считать, что практически отсутствует петля гистерезиса.

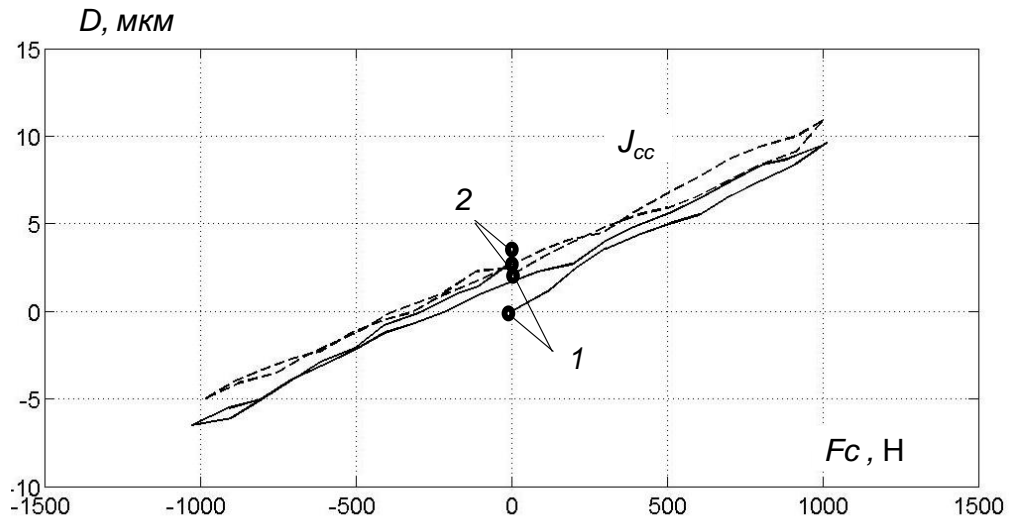


Рис. 7.33. Кривые статической крутильной жёсткости J_{cc} планшайбы: сплошная кривая – первое измерение, пунктирная – второе измерение, 1 – начало измерений, 2 – окончание измерений.

Поведение несущей системы станка МС – 300 при квазистатическом нагружении можно объяснить, если обратиться к блок-схеме, представленной на рис. 7.2.

При воздействии на несущую систему статической силой F перемещение исполнительного органа машины - массы m_2 будет происходить только за счет деформации пружины (жёсткости) c_2 . Деформации в механической части подсистемы I (c_1) не влияют на перемещение массы m_2 благодаря действию ПИД – регулятора, обеспечивающего $x_0 = x_3 = 0$.

По характеру поведения кривых статической жёсткости можно судить о двух важных положениях:

- насколько сильно деформируется механическая часть подсистемы II несущей системы от действия на неё квазистатической силы (степень изменения (трансформации) траектории движения рабочих органов машины под действием квазистатической силы),

- насколько качественно изготовлена механическая часть подсистемы II несущей системы машины (форма петли может свидетельствовать о наличии зазоров в подвижных соединениях, качестве изготовления и сборки непо-

движных соединений и др. и использоваться в качестве диагностического признака качества изготовления несущей системы машины).

По характеру поведения кривых статической жесткости, получаемых по данной методике, ничего нельзя сказать о жесткостных свойствах подсистемы I. Однако о жесткостных и демпфирующих свойствах подсистемы I и всей несущей системы машины в целом можно судить по «отклику» несущей системы на силовое воздействие и/или кинематическое воздействие.

По результатам экспериментального исследования статической жесткости несущей системы 5 координатного станка последовательной структуры можно сделать **ВЫВОД**.

Измерение статической жесткости многокоординатных станков (машин) с ЧПУ по разработанной методике может применяться:

- для оценки уровня совершенства конструкции несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ;
- для оценки качества сборки отдельных подсистем машины;
- для анализа возможных причин низкой статической жесткости несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ.

Основными требованиями для статической жесткости должны быть два:

1) практическое отсутствие петли гистерезиса (необходимое условие выполнения чистовых, получистовых и тяжёлых операций на одном многоцелевом универсальном станке),

2) величина статической жесткости должна быть достаточной для обеспечения виброустойчивости машины для выполнения своих основных функций (среднестатистические данные).

В настоящее время считается, что статическая жёсткость для многокоординатных прецизионных станков с ЧПУ должна быть более 50 Н/мкм [148].

Влияние динамической (> 1 Гц) составляющей на отклонения воспроизведения траектории движения ИО машины можно оценить с помощью динамической податливости. Эти вопросы рассмотрены ниже.

7.1.6.3. Методика определения динамической податливости несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ

Для изучения податливости НС многокоординатной машины удобно использовать специально разработанную методику, основанную на ступенчатой разгрузке НС, реализуемой спусковым механизмом [61].

Ступенчатое воздействие широко применяется в электротехнике для получения динамических характеристик линейных систем [30].

Для получения ступенчатого силового воздействия было спроектировано и изготовлено совместно ИМАШ РАН и ОАО НИАТ специальное спусковое приспособление. На рис. 7.34 представлен общий вид рабочей зоны станка при измерении динамической податливости методом ступенчатого воздействия на НС. Здесь: 1 - нагружающее устройство (винтовой домкрат), 2 - динамометр, 3 - спусковой механизм, 4 - корпус шпинделя, 5 - вибродатчик и 6 - штифт для установки оптического отражателя лазерного интерферометра при измерении динамической податливости

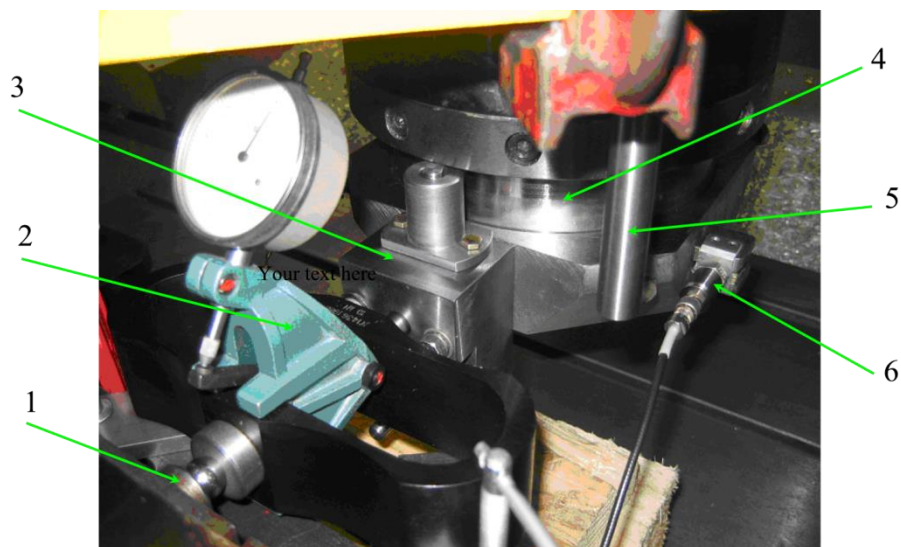


Рис. 7.34. Общий вид рабочей зоны станка при измерении динамической податливости методом ступенчатого воздействия на НС

Нагружение несущей системы станка (корпус шпинделя – стол) осуществляется силой 500 Н через винтовой домкрат и динамометр. Далее, с помощью спускового механизма резко снимается нагрузка. В этот момент НС станка начинает колебаться и перемещения корпуса шпинделя во времени записываются с помощью лазерного интерферометра ML10.

На рис. 7.35 представлен, в качестве примера, записанный временной сигнал «перемещение Y - время» при действии ступенчатого воздействия в направлении оси Y , а на рис. 7.36 представлен спектр этого колебательного процесса (амплитуда колебаний (перемещение) – частота).

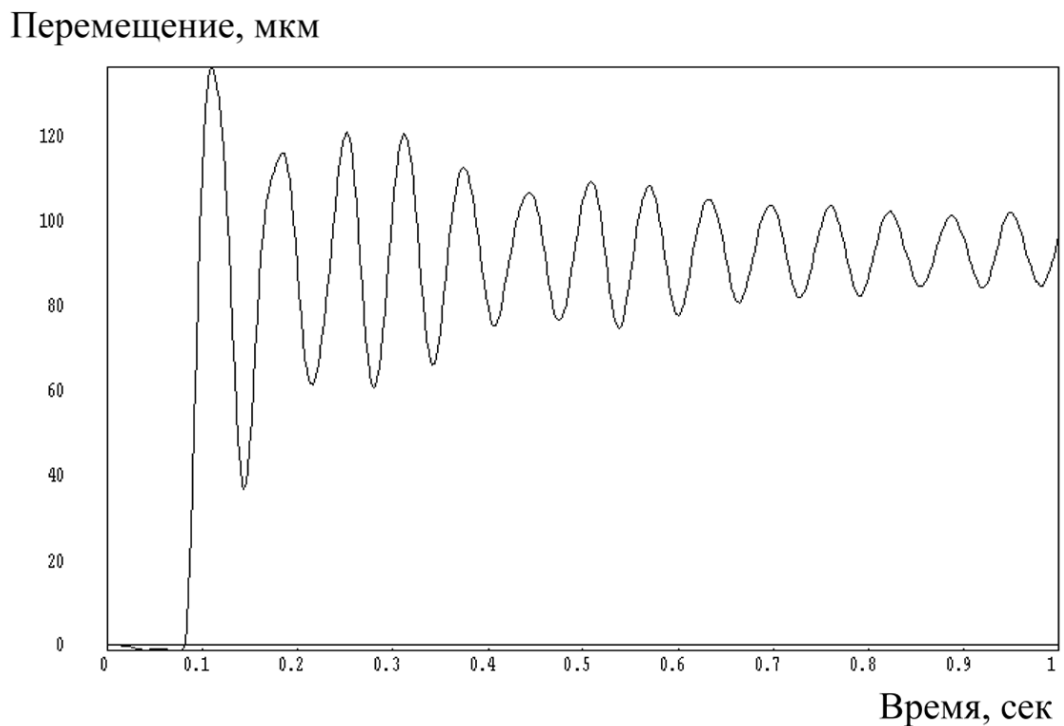


Рис. 7.35. Реакция НС станка на ступенчатое силовое воздействие, записанная как «перемещение Y - время».

Программное обеспечение лазерного интерферометра ML 10, позволяет оцифровывать кривую спектра «амплитуда колебаний (перемещение) – частота» и составлять (в ручном режиме) таблицу «амплитуда A_s , мкм - частота f , Гц».

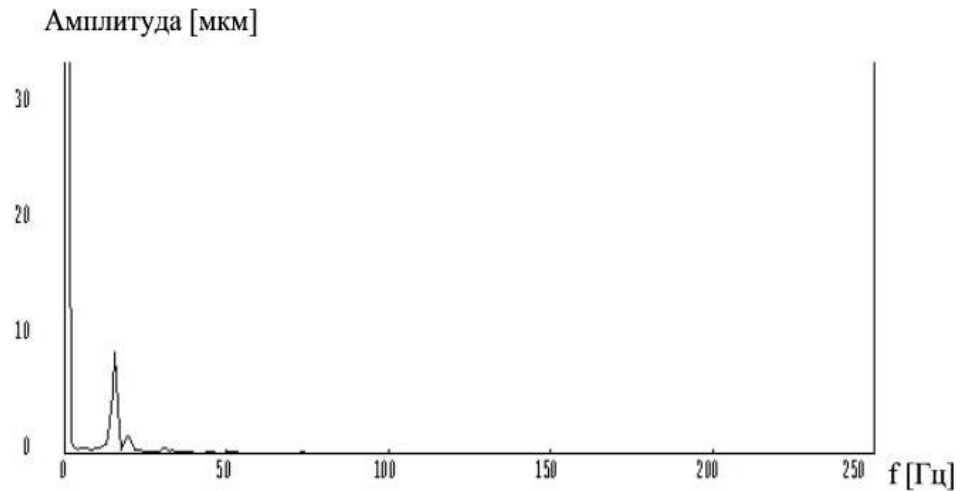


Рис. 7.36. Реакция НС станка на ступенчатое силовое воздействие, записанная как спектр (амплитуда колебаний (перемещение) – частота).

Для силового воздействия типа «идеальная единичная ступенька» известно аналитическое представление спектра «амплитуда «силовой» гармоники A_F – частота» [30]:

$$A_F = 1/\omega,$$

где ω - круговая частота

При «ступеньке» с фронтом нарастания сигнала по экспоненте с коэффициентом β спектр вычисляется по формуле:

$$A_F = \frac{1}{\omega \sqrt{1 + (\omega / \beta)^2}} \quad (7.1)$$

где β - коэффициент «нарастания – спада» силы.

β определяется по временному сигналу ускорения в НС станка, передний фронт которого равен фронту нарастания – спада силы. Для рассматриваемого случая временной сигнал ускорения представлен на рис. 7.37.

Коэффициент β определяется как

$$\beta = 2,3/t_{\text{фа}},$$

где $t_{\text{фа}}$ – время активного фронта спада приложенной нагрузки. В свою очередь, время $t_{\text{фа}}$ определяется как

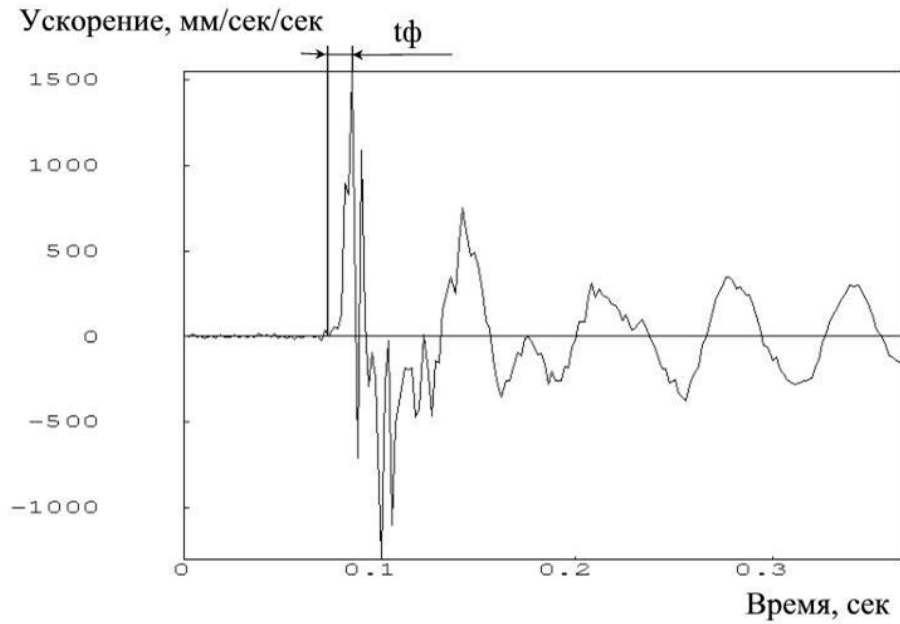


Рис. 7.37. Временной сигнал ускорения при силовом воздействии типа «ступенька»

$$t_{\phi a} = 0,8 t_{\phi},$$

где t_{ϕ} – время фронта спада приложенной нагрузки (см. рис.7.37, величина t_{ϕ} обозначена t_{ϕ})

Для нашего случая $t_{\phi} = 0,086 - 0,072 = 0,014$ сек, $\beta = 205,4$ сек⁻¹.

Используя данные таблицы «амплитуда A_s , мкм - частота f , Гц» и зависимость (7.1), строятся динамическая податливость W для НС станка как

$$W = \frac{A_s(f)}{A_F(f)}, \text{ мкм/Н.}$$

На рис. 7.38 представлена кривая 1 динамической податливости W_{yy} в направлении Y .

Для сравнения на этом рисунке представлена кривая 2 динамической податливости W_{yy} , полученная методом возбуждения центробежной силой [21, 61-62] и прямая 3 податливости при статическом режиме нагружения.

Совпадение результатов измерения динамической податливости, полученных двумя способами, хорошее. Динамическая податливость на 1-й собственной частоте (15 Гц) может быть примерно в 8 раз больше податливости при статическом режиме нагружения.

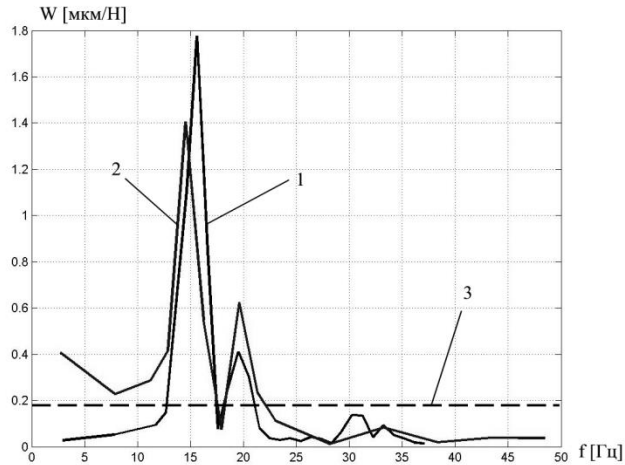


Рис. 7.38. Кривые динамической податливости при различных способах возбуждения: 1- ступенчатое силовое возбуждение, 2 – кинематическое возбуждение, 3 - статическая податливость

Ступенчатый метод возбуждения позволяет определять динамическую податливость в направлении перпендикулярном к направлению действия возбуждающей силы, т.е. определять поперечную динамическую податливость и оценивать взаимовлияние.

На рис. 7.39 показана кривая поперечной динамической податливости W_{yx} (силовое воздействие в направлении Y , измерение перемещений по X).

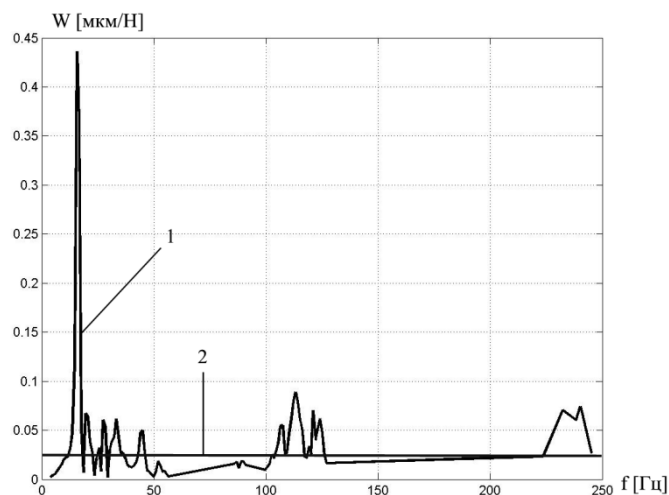


Рис. 7.39. Поперечная динамическая податливость: 1 - кривая поперечной динамической податливости W_{yx} , 2- поперечная статическая податливость

Из рис. 7.39 видно, что в динамике взаимовлияние координат ХУ (колебания в направлении У вызывают колебания платформы Гауфа - Стюарта в направлении Х и наоборот) значительно сильнее (в 20 раз), чем при статике.

Указанный факт очень важен для объяснения возникновения «вибрационного следа» (станок «Гексамех-1» на обработанной поверхности (рис. 7.40).

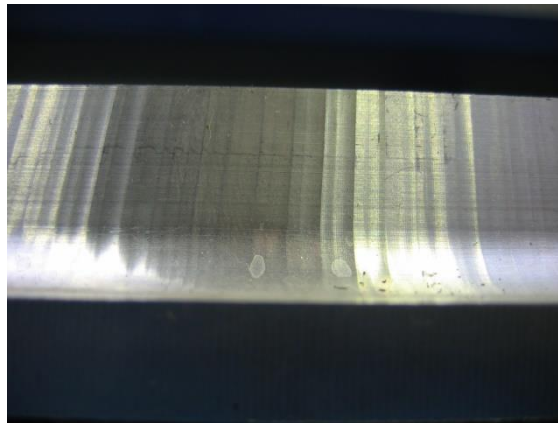


Рис. 7.40. «Вибрационный след» при обработке боковой поверхностью фрезы образца - изделия: скорость вращения шпинделя $S = 18000$ об/мин, подача $F = 2000$ мм/мин, обрабатываемый материал – ДТ 16 М с термообработкой, режущий инструмент цилиндрическая фреза с сферическим закруглением из быстрорежущей стали и винтовой спиральной канавкой $\varnothing 16$, $Z = 2$.

Силы, действующие вдоль движения платформы, могут вызывать колебательные движения в поперечном направлении.

Частота «вибрационного следа» при автоколебаниях соответствует 1-й собственной частоте ($f = 15,5$ Гц) НС.

В заключении данного параграфа следует отметить, что знание динамической податливости очень важно для проведения моделирования динамических процессов в многокоординатных машинах как для анализа виброустойчивости и исследования влияния сил резания на точность воспроизведе-

дения заданной траектории в пространстве, так и решения задач синтеза конструкций несущих систем повышенной точности и виброустойчивости .

7.2. Элементы калибровки и диагностики многокоординатной машины при сборке

7.2.1. Алгоритм калибровки

Опыт проведения калибровки на многокоординатных станках с ЧПУ показывает, что процесс калибровки состоит из ряда последовательных процедур. Выполнение этих процедур поясняет блок-схема, представленная на рис. 7.41



Рис. 7.41. Процесс калибровки многокоординатной машины с ЧПУ

Методика калибровки состоит в следующем:

- 1) Принимается «норма» для проведения коррекции первичных отклонений.

2) После того как машина собрана и подготовлена для проведения испытаний на геометрическую точность на холостом ходу осуществляется измерение первичных отклонений.

3) Измеренные отклонения сравниваются с допуском (приёмочным допуском) на изготовление машины. Если все отклонения в допуске, то машина считается годной и переходят к другим видам испытаний. Полученные результаты измерений первичных отклонений фиксируются и вносятся в документ (руководство, паспорт), прилагаемый к данному экземпляру машины. Эти данные могут использоваться при эксплуатации станка, в частности для диагностики точности машины после её ремонта.

4) В противном случае, когда допуск на изготовление машины превышен, осуществляется анализ степени превышения допуска и характера поведения измеренного отклонения. Если измеренные отклонения не выходят за рамки установленных норм, то осуществляется процедура коррекции и снова проводится измерение первичных отклонений, и так до тех пор, пока не будет достигнуто условие годности машины.

5) Если измеренные первичные отклонения превышают рамки установленных норм на проведение коррекции, то проводится диагностика причины выхода за рамки норм.

6) После установления причины, проводится её устранение (разборка, замена, юстировка и др.) и процесс калибровки повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто условие годности машины.

7.2.2. Установление норм на проведение коррекции

Одним из основных элементов построения методики диагностирования точности многокоординатной машины по результатам измерения точности позиционирования является назначение «нормы» точности позиционирования без коррекции (возможности проведения коррекции).

Главными являются величина случайной составляющей R и поведение отклонения обратного хода B . Они должны быть в пределах допуска на изготовление машины, а функциональная составляющая M должна быть «плав-

ной» кривой без разрывов. Допустимая величина размаха функциональной составляющей М должна назначаться по результатам изготовления опытной партии машины или по накопленной информации по изготовлению аналогичных машин и узлов.

Из табл. 6.3, 6.5, 6.6, 6.7 и 6.8. а также в соответствии с указанными соображениями для данной конструкции станка «нормой» для проведения коррекции могут быть приняты значения, представленные в табл. 7.5.

Табл. 7.5

Показатели точности позиционирования, которые можно использовать в качестве нормы для проведения коррекции.

Координата	Станок, №	Общая точность, А, мкм, без корр./ с корр.	Отклонение обратного хода, В, мкм, без корр./ с корр.	Случайная составляющая, R, мкм, без корр./ с корр.	Функциональная часть, М, мкм, без корр./ с корр.	Интервал регулирования температуры, С°
X	6	10,7/4,2	1,2/1,6	1,2-1,9/1,8-2,2	9,3/2,1	19°+/-0,1°
Y	3*	15,7/ 8,2	1,2/ 1,8	5,4-5,0/3,4-7,2	12,4/ 3,8	19°+/-0,1°
Z	6	-17,3/6,2	2,4/1,8	2,4-3,2/3,6-4,8	14,8/1,2	19°+/-0,1°
C	3	5,8/	1,2/	2,6-3,5/	2,7/	19°+/-0,1°
B	3	28,5/	3,2/	1,6-1,8/	26,3/	19°+/-0,1°

7.2.3. Методика диагностики

Задача диагностики точности машины при её сборке состоит в выявлении причин (источников) возникновения превышения измеренных параметров точности норм коррекции.

Методика диагностики состоит в следующем.

1) Сначала выявляется: является ли превышение норм в одном параметре, в группе параметров или во всех параметрах? Во многих случаях помогает визуальное наблюдение поступления результатов измерения, например, на дисплей лазерного интерферометра.

2) По полученной информации и в соответствии с накопленным опытом выдвигается гипотеза о причине превышения. В соответствии с гипоти-

зой строится модель образования отклонений и устанавливается порядок проведения последующих измерений (исследований), если они требуются.

3) Проводится поиск параметров механизма несущей системы станка, через которые можно устранить наблюдаемое отклонение.

4) Осуществляется изменение параметров механизма. Проводятся повторные измерения и цикл калибровки.

Для проведения представленной методики диагностики необходимо:

1) Соответствующее аттестованное измерительное оборудование.

2) Операторы, осуществляющие измерение первичных и интегральных отклонений механизмов машины, должны быть аттестованы.

3) Инженер – исследователь должен:

- знать конструкции многокоординатных машин с ЧПУ, теорию образования первичных и интегральных отклонений многокоординатных машин с ЧПУ,

- овладеть методикой и средствами измерения первичных и интегральных отклонений механизмов машин с ЧПУ,

- знать процедуры введения коррекций в системы ЧПУ многокоординатных машин.

Указанные условия, например, могут выполняться в центрах коллективного пользования измерительной аппаратурой как, например, ЦКП «Исследование и диагностика точности машин» при ИМАШ РАН или на объединённых кафедрах в рамках «ВУЗ – Институт РАН» [26].

Описанная выше диагностика касается измерений, проводимых на холостом ходу в статическом режиме.

Преимуществами представленной диагностики являются:

1) Диагностика базируется на измерениях и анализе первичных отклонений в соответствии с ГОСТ 22267-76, которые осуществляются во всем рабочем объеме машины (станка).

2) Диагностика базируется на достоверном разбиении отклонений позиционирования по линейным и угловым координатам в соответствии с

ГОСТ 27843-2006 и ISO 230-2 1997 на функциональные отклонения, случайные отклонения, отклонения обратного хода, интегральные отклонения.

3) Диагностика проводится в рамках обязательных испытаниях машины (станка) на геометрическую точность, проводимых на холостом ходу.

Представленная методика развивает диагностику, основанную на измерениях отклонений воспроизведения эталонной траектории.

Методика диагностики, основанной на измерениях отклонений воспроизведения эталонной траектории (окружности ф. Renishaw) имеет преимущество, заключающееся в том, что выявляются отклонения, проявляющиеся при действии инерционных нагрузок (боковой «люфт», несогласованность приводов, всплески отклонений («пики») при реверсе координат и др.). Однако эта методика имеет недостаток - измеряется локальная зона, ограниченная окружностью.

Предлагаемая методика должна быть частью общей методики диагностики точности машины. При диагностике методами, основанными на измерениях отклонений воспроизведения эталонной траектории, можно применять средства измерений отклонений от эталонной траектории, подробно описанные в главе V.

Представляется целесообразным дальнейшее развитие диагностики машины путём сочетания диагностики точности с диагностикой статической и динамической жесткости. Диагностика статической жёсткости строится на использовании информации, содержащейся в гистерезисной кривой «деформация - нагружающая сила». Нагружение силой растяжения – сжатия должно производиться без переустановки нагружающего устройства [103]. Диагностику статических и динамических свойств многокоординатной машины удобно строить на использовании информации о динамическом отклике исполнительных органов машины на ступенчатое воздействие [60,101, 104].

7.2.4. Примеры проведения диагностики при нарушении норм на проведение коррекции

У станка № 4 показатели точности позиционирования по координате В существенно превышены и, как показали ремонтные работы при эксплуатации станка, в собранном узле поворота корпуса планшайбы оказался дефект сборки: подвижная часть тормозной муфты соприкасалась с неподвижной трубой ограждения прокладки кабелей. В непредусмотренном стыке возникали силы трения, которые вызывали повышенные отклонения при позиционировании по координате В (рис. 7.42). На момент пуска станка этот дефект не был выявлен, а был выявлен в процессе эксплуатации.

Аналогичный дефект наблюдался на станке № 5 (рис. 7.43). Здесь происходило соприкосновение корпуса бесконтактного датчика с кулачком, который жёстко связан с корпусом планшайбы.

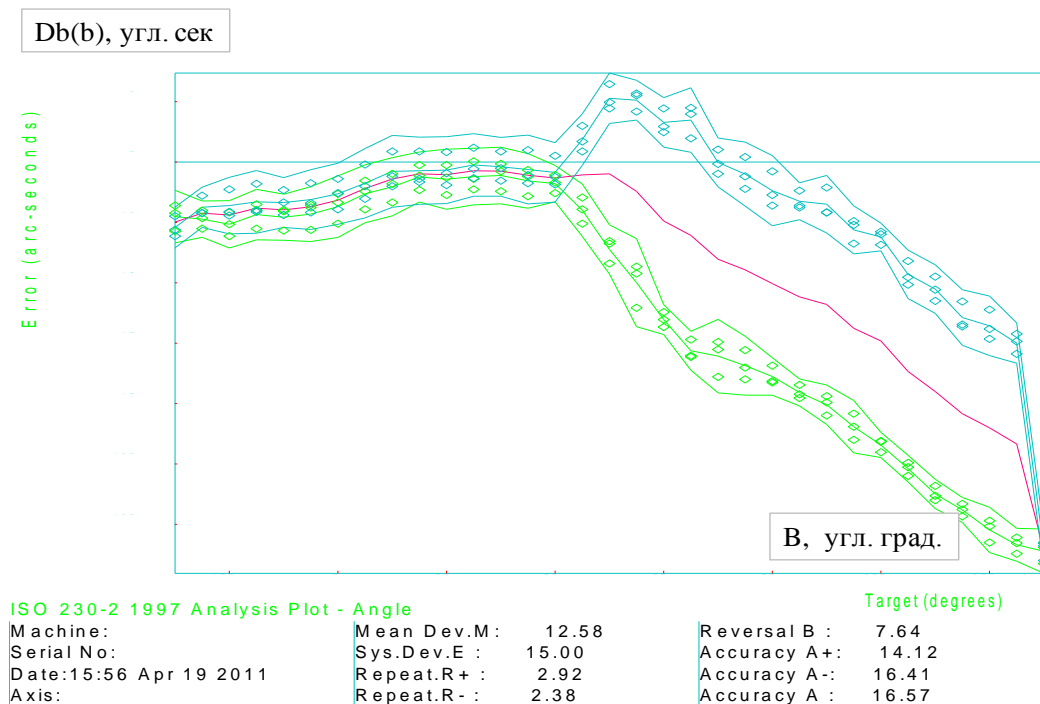


Рис. 7.42. Кривые точности позиционирования по координате В для станка № 4 (трение металл по металлу)

Здесь чётко видно, что момент начала соприкосновения (трения) наступает вблизи угла поворота 40° . Кривые отклонений раздваиваются, и возникает большое отклонение обратного хода. Введение коррекции не-

сколько уменьшает общий показатель точности с $A = 16,6$ мкм (рис. 7.42) до 12,8 мкм (рис. 7.44). Только после устранения дефекта проблема решается полностью $A = 5,3$ мкм (рис. 7.45).

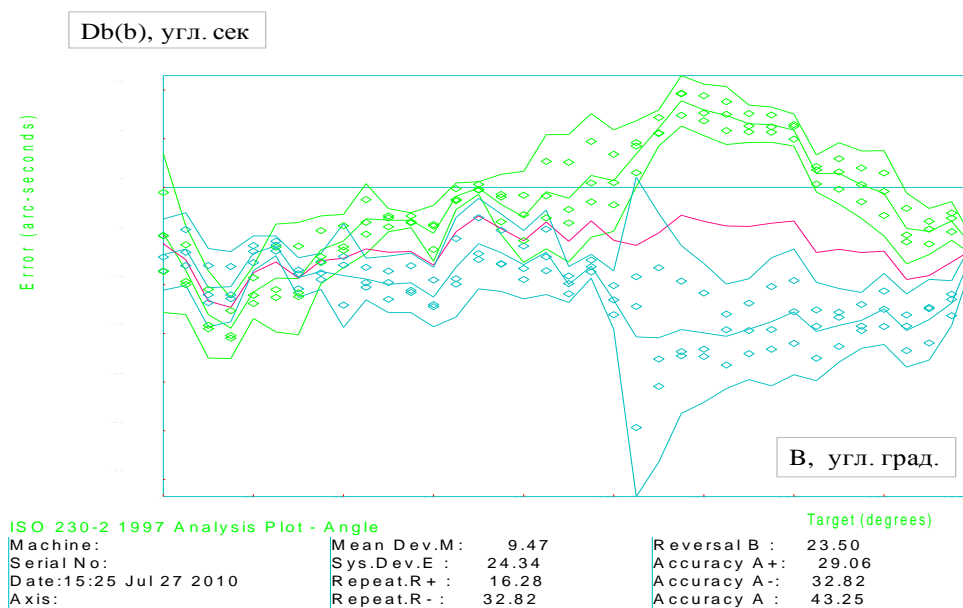


Рис. 7.43. Кривые точности позиционирования по координате B для станка № 5 (трение пластмасса по металлу) до проведения коррекции

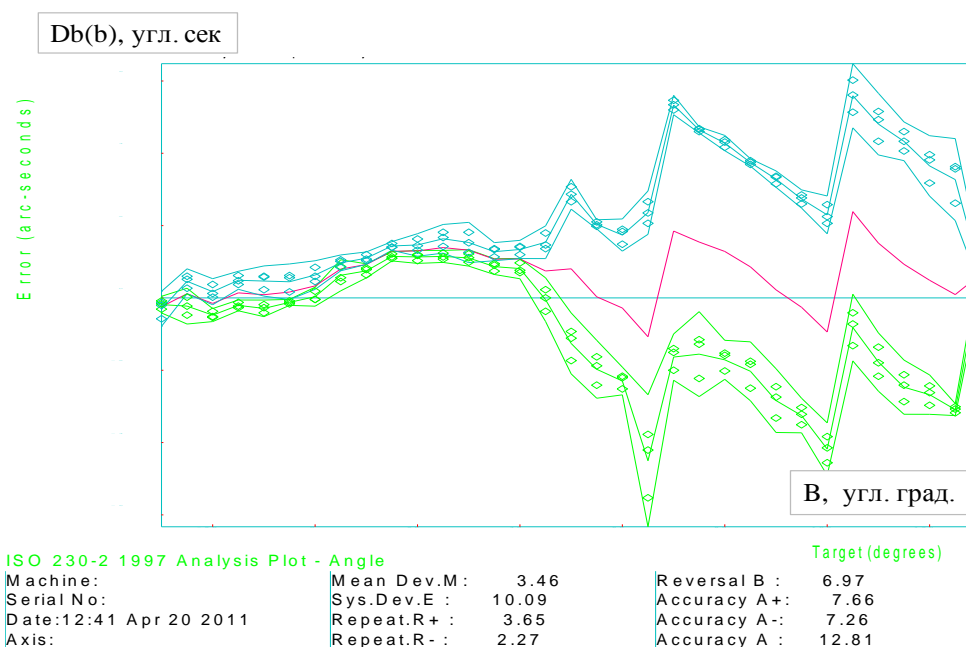


Рис. 7.44. Кривые точности позиционирования по координате B для станка № 4 (трение металл по металлу) после проведения коррекции до устранения дефекта

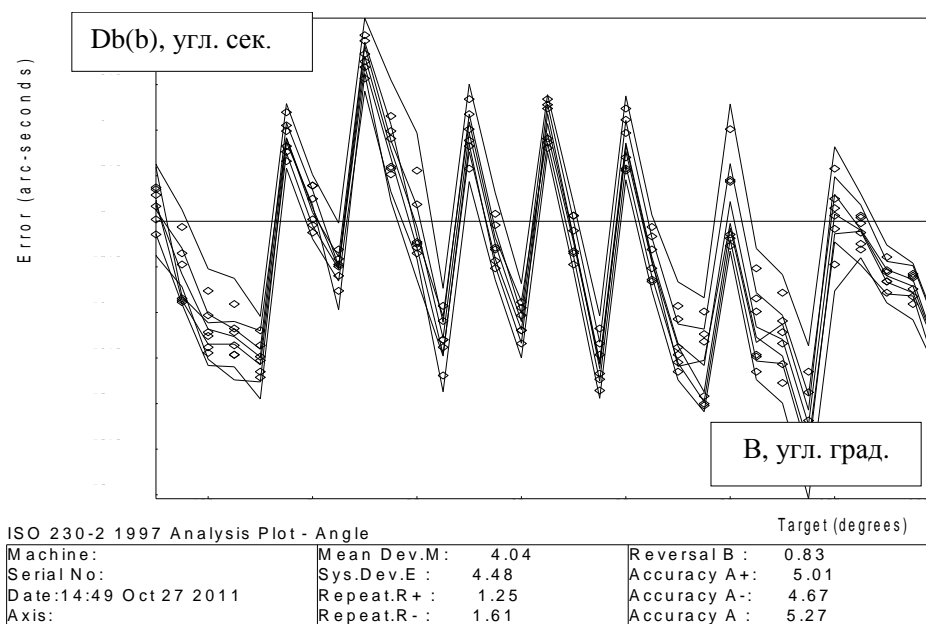


Рис. 7.45. Кривые точности позиционирования по В для станка № 4 после устранения дефекта соприкосновения и проведения коррекции

На рис. 7.46 показано поведение кривой отклонения по В для станка № 5 после устранения дефекта (правильная установка корпуса бесконтактного датчика). Это позволило существенно уменьшить отклонение обратного хода с $B = 23,5$ мкм (рис. 7.43) до $B = 1,0$ мкм (рис. 7.46) и общий показатель точности до $A = 6,2$ мкм (рис. 7.46).

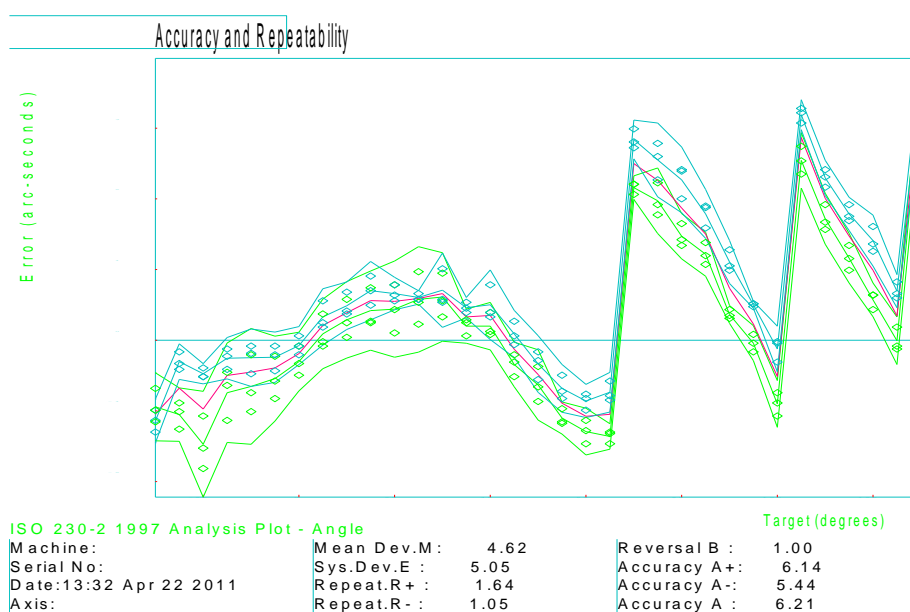


Рис. 7.46. Кривые точности позиционирования по В для станка № 5*, (трение о корпус бесконтактного датчика) после устранения дефекта и проведения коррекции

Обобщая, можно сказать, что некоторые дефекты можно выявить учитывая, что:

1) Недостаточная жесткость НС приводит к деформациям при реверсе → увеличенные погрешности обратного хода (рис. 6.3 – 6.4).

2) Сухое трение (металл по металлу) → увеличение суммарной составляющей и отклонения обратного хода.

3) Сухое трение (металл по пластмассе) → увеличение всех составляющих (рис. 7.42).

4) нестабильность теплового режима основных узлов станка → увеличение случайной составляющей (рис. 6.16, рис. 6.17, г), рис. 6.21, рис. 6.23).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Сформулирован принцип повышения точности, основанный на сочетании конструкторско-технологических методов уменьшения случайной составляющей отклонений с цифровой коррекцией систематической части.
2. Выявлены способы цифровой коррекции первичных и интегральных отклонений для многокоординатной машины с ЧПУ.
3. Введено понятие механизма «управляемый по программе ползун» и «управляемый по программе шарнир», разработана методика анализа первичных отклонений звеньев механизмов с поступательными и вращательными парами и выработано правило их измерения.
4. Создана методика синтеза математической модели образования интегрального отклонения для многокоординатной машины с ЧПУ.
5. Предложен модифицированный способ коррекции первичных отклонений машины с ЧПУ и создана методика анализа и синтеза точности многокоординатной машины с использованием имитационного моделирования.
6. Проведена систематизация средств измерения первичных и интегральных отклонений для многокоординатных машин с ЧПУ и разработаны методика и устройство для измерения отклонений пересечения осей поворота столов.
7. Проведен анализ влияния квазистатических возмущающих факторов (веса и температуры узлов) на первичные и интегральные отклонения.
8. Предложена динамическая модель НС многокоординатной машины с ЧПУ и разработана методика анализа её поведения на различных режимах работы.
9. Проведены эксперименты и систематизирована информация по испытаниям на холостом ходу многоцелевых станков с ЧПУ (МС 300, Гексамех-1, МЦ-1, ФП 17, ФП 27 и др.).
10. Разработаны элементы калибровки и диагностики точности многокоординатной машины при её сборке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптивное управление станками / Под ред. Б. С. Балакшина. М.: Машиностроение, 1973. 688 с.
2. Андрейчиков Б. И. Методы коррекции динамических ошибок в станках с программным управлением // Автоматика и телемеханика. 1962. № 9. С. 1165-1178.
3. Андрейчиков Б. И. Динамическая точность систем программного управления станками. М.: Машиностроение, 1964. 368 с.
4. Анисимов Б. В. Коррекция динамических погрешностей станка с цифровым программным управлением // «Вычислительная техника»: Сб. статей / Под ред. Б. В. Анисимова. М.: Оборонгиз, 1963. С. 5-16.
5. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. Учеб. для вузов / 4 -е изд. перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1988. 640 с.
6. Архангельский Л. А., Ткачевский Г. И., Лившиц Г. А. Повышение кинематической точности зубофрезерных станков. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1954. 202 с.
7. Астанин В. О., Сергиенко В. М. Исследование металлорежущего станка нетрадиционной компоновки // Станки и инструмент. 1993. № 3. С. 5-8.
8. Ачеркан Н. С. и др. Металлорежущие станки / Под ред. Н. С. Ачеркана; В 2 томах. М.: Машиностроение, 1965. Т. 1. 764 с.
9. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1969. 358 с.
10. Базров Б. М. Расчет точности машин на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
11. Блинов В. Б., Евстигнеев В. Н., Гринглаз А. В. Экспериментальные исследования статических и динамических характеристик многоцелевого станка // Станки и инструмент. 1986. № 12. С. 5-8.
12. Болотин Л. М. Повышение точности аналитически программируемых промышленных роботов на основе анализа и коррекции их моделей: Дис-

- сертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (далее: Дис. ... канд. техн. наук). М., 1985. 197 с.
13. Брейдо М. И., Быховский М. Л., Кобринский А. Е. Самонастраивающаяся система программного управления металлорежущими станками / Авт. свид. № 120781. Б.И. 1966. № 14.
 14. Бруевич Н. Г. Точность механизмов. М.: ГИТТЛ, 1946. 332 с.
 15. Бруевич Н. Г., Доступов Б. Г. Счетно-решающие устройства / Под ред. Н. Г. Бруевича.: Изд. ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 1954. 412 с.
 16. Бруевич Н. Г., Сергеев В. И. Основы нелинейной теории точности и надежности устройств. М.: Наука, 1976. 136 с.
 17. Бушуев В. В. Компенсация упругих деформаций в станках // Станки и инструмент. 1991. № 3. С. 42–46.
 18. Бушуев В. В. Жесткость станков // СТИН. 1996. № 8. С. 26-32.
 19. Бушуев В. В. Жесткость станков // СТИН. 1996. № 9. С. 17-20.
 20. Вайнштейн И. В., Серков Н. А., Сироткин Р. О. Станки для высокоскоростной обработки деталей и перспективы их развития в машиностроении // Авиационная промышленность. № 3. 2006. С. 49-55.
 21. Вайнштейн И. В., Серков Н. А., Сироткин Р. О., Мерзляков А. А. Экспериментальные исследования жесткости 5-ти координатного станка с параллельной кинематикой // СТИН. 2009. № 1. С. 6-11.
 22. Вайнштейн И. В., Серков Н. А., Сироткин Р. О. Экспериментальное исследование статической жёсткости 5-ти координатного фрезерного станка с параллельной кинематикой // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2007. № 5. С. 102-109.
 23. Вильсон А. Л., Иорданян Р. В., Великовский В. А. Оценка динамического качества станка по параметрам волнистости поверхности обработанных деталей в производственных условиях: Методич. рук. / Под ред. Б. И. Черпакова. М.: ЭНИМС, 1987. 35 с.
 24. Волосов С. С. Основа точности активного контроля размеров / 2 изд. М.: Машиностроение, 1969. 369 с.

25. Вотинов К. В. Жёсткость станков. Л.: Лониномаш, 1940. 86 с.
26. Григорьев С. Н. Повышение эффективности подготовки инженерно-технических кадров для машиностроения // Вестник МГТУ «Станкин» - 2012 (22). - № 3. - С. 7-13.
27. Гусев И. Т., Беляев Н. Н., Иванов А. И. Об одном методе коррекции программы управления // Некоторые вопросы кибернетики. 1970. Вып. 1 – V. С. 135-149.
28. Детали и механизмы металлорежущих станков / Коллектив авторов под ред. д-ра техн. наук Д. Н. Решетова; В 2 томах. М.: Машиностроение, 1972. Т.1. 664 с.
29. Динамика машин и управление машинами: Справочник / В. К. Асташев, В. И. Бабицкий, И. И. Вульфсон и др.; Под ред. Г. В. Крейна. М.: Машиностроение, 1988. 240 с. (Основы проектирования машин).
30. Ицхоки Я. С. Импульсные устройства. Изд. «Советское радио», М., 1959 г., 728 с.
31. Калашников Н. А. Точность в машиностроении и её законы. М.: Машгиз, 1961. 284 с.
32. Каспарайтис А. Ю. Методы исследования и построение прецизионных автоматических координатных измерительных машин: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1990. 42 с.
33. Каспарайтис А. Ю., Шилюнас П. И. Метод оценки составляющих погрешности координатных измерительных машин // Измерительная техника. 1990. № 7. С. 15-18.
34. Кинематика, динамика и точность механизмов: Справочник / Под ред. Г. В. Крейна. М.: Машиностроение, 1984. 224 с. (Основы проектирования машин).
35. Кобринский А. А., Кобринский А. Е. Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985. 344 с.

36. Кобринский А. Е., Левковский Е. И., Серков Н. А. Классификация систем управления станками по информационным признакам // Станки и инструмент. 1971. № 1. С. 1-4.
37. Кобринский А.Е. Шаговая система программного управления станками // Вестник АН СССР. 1957. № 9. С. 71-76.
38. Кобринский А. Е., Саламандра Б. Л. Серков Н. А и Степанцев Б. М. Измерительные машины с ЧПУ для адаптивных систем управления станками // Станки и инструмент. 1974. № 8. С. 37-39.
39. Кобринский А. Е., Левковский Е. И., Серков Н. А., Рукин А. Е. Автоматизация измерений при применении координатных измерительных машин // Станки и инструмент. 1979. № 1. С. 9-12.
40. Кобринский А. Е., Серков Н. А. Применение принципов адаптации при токарно-копировальной обработке // Машиноведение. 1970. № 1. С. 15-23.
41. Кобринский А. Е., Серков Н. А. Адаптивные системы управления станками с коррекцией программ // Станки и инструмент. 1979. № 7. С. 15-17.
42. Кобринский А. Е., Серков Н. А., Постонен У. М. Устройство коррекции траектории движения режущего инструмента / Авт. свид. № 312679. Б.И. № 26. 1971.
43. Колискор А. Ш. Измерения и коррекция программ в самонастраивающейся системе цифрового управления фрезерным станком: Дис. ... докт. техн. наук. М., 1966. 385 с.
44. Колискор А. Ш. Разработка и исследование промышленных роботов на основе 1 – координат // Станки и инструмент. 1982. № 12. С. 21-24.
45. Колискор А. Ш., Коченов М. И. Методы проверки точности функционирования промышленных роботов // Станки и инструмент. 1978. № 8. С. 7-10.
46. Коловский М.З. Динамика машин. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. 263 с.

47. Колчин Н. И. Механика машин / Часть V: Дополнительные вопросы механики машин по расчету и проектированию механизмов. М.-Л.: Машгиз, 1957. 320 с.
48. Координатные измерительные машины и их применение / В.-А. А. Гапшис, А. Ю. Каспарайтис, М. Б. Модестов, В.-З. А. Раманаускас, Н. А. Серков, В. А. Чудов. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
49. Корендясев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. Теоретические основы робототехники / Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; Отв. ред. С.М. Каплунов; В 2 книгах. М.: Наука, 2006. Кн. 1. 383 с. 2006. Кн.2. 376 с.
50. Крайнев А. Ф. Механика от греческого *mēchanicē (téchne)* – искусство построения машин: Фундаментальный словарь. М.: Машиностроение, 2000. 904 с.
51. Кузнецов В. А., Ялунина Г. В. Общая метрология. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 272 с.
52. Левитский Н. И. Теория механизмов и машин. М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. Лит., 1990. 592 с.
53. Левина З. М., Решетов Д. Н. Контактная жёсткость машин. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
54. Линейки поверочные / ОАО «Ставропольский Инструментальный Завод»: [сайт] [Электронный ресурс] URL: <http://www.stizinstrument.ru/> (Дата обращения: 19.03.2012).
55. Лойцянский Л. Г. и Лурье А. И. Курс теоретической механики / Том первый; Статика и кинематика. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. 379 с.
56. Марков Н. Н., Кайнер Г. Б., Сацердотов П. А. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. М.: Машиностроение, 1967. 390 с.
57. Махровский В. Г. Метрология и теория точности конструкций / Труды ВНИИМ; выпуск 12 (72): «Исследования в области линейных измерений». М.-Л.: Машгиз, 1951. С. 5-39.

58. Мерзляков А. А., Серков Н. А., Сироткин Р. О. Экспериментальные исследования влияния статической и динамической жёсткости станка с параллельной кинематикой на точность обработки детали / Тезисы докл. «Международная конференция по теории механизмов и механике машин». Краснодар. 2006. 9-15 октября. С 163-164.
59. Мерзляков А.А., Серков Н.А., Сироткин Р.О. Особенности испытаний станка – гексапода / Тезисы докладов III Международной научной конференции «Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин». Астрахань. 2007. 10-16 сентября. С. 70.
60. Мерзляков А. А., Серков Н. А., Сироткин Р. О. Экспериментальные исследования динамических свойств станка с параллельной кинематикой // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2008. № 1. С.98-102.
61. Мерзляков А. А., Серков Н. А. Сироткин Р. О. Способы возбуждения колебаний при исследовании динамики механических систем / Сб. трудов VIII Международной научно-технической конференции по динамике технологических систем (в трех томах). Ростов-Дон: Издательский центр ДГТУ, 2007. Том II. С.194-199.
62. Мерзляков А. А., Серков Н. А., Сироткин Р. О. Экспериментальные исследования динамических свойств станка с параллельной кинематикой мод. «Гексамех-1» / Сб. трудов XV Симпозиума: «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем»; Под ред. В.К. Асташева, В.Л. Крупенина, Е.Б. Семеновой. Москва-Звенигород: 2006. С.195-200.
63. Методы измерений // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.support17.com/component/content/566.html?task=view>. (дата обращения: 23.03.2012).
64. Никуличев И.В., Серков Н.А. Влияние системы охлаждения на точность позиционирования многоцелевого станка модели МС-300М // Вестник МГТУ «Станкин» - 2012 (22). - № 3. - С. 77-82
65. Основы теории точности механизмов / Н. Г. Бруевич, Е. А. Правоторова, В. И. Сергеев. М.: Наука, 1988. 238 с.

66. Оптические цифровые измерительные системы / ООО «Оптротех» // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.optrotech.ru/prod.php>. (дата обращения: 23.03.2012).
67. ОТКЛОНЕНИЕ И ДОПУСКИ РАСПОЛОЖЕНИЯ (ГОСТ 24642-81) // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: http://www.propro.ru/graphbook/eskd/eskd/GOST/2_308/002.htm#b07 (дата обращения: 23.03.2012).
68. Палей М. А. Отклонения формы и расположения поверхностей. М.: Издательство стандартов, 1973. 242 с.
69. ПОДПРОГРАММА "Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности" на 2011 - 2016 годы федеральной целевой программы "Национальная технологическая база" на 2007 - 2011 годы [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stankoinstrument.ru/d/56735/d/podpragr.razvit.s-niya.doc>. (дата обращения: 7.12.2012).
70. Подураев Ю. В. Мехатроника. Основы, методы, применение. 2-е изд., перераб и доп. М.: Машиностроение, 2007. 256 с.
71. Попов В. Е., Серков Н. А., Пан Е. И. Организация автоматизированного участка для шлифования лопаток // Станки и инструмент. 1982. № 3. С. 6-9.
72. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник - учебник / В 3 томах; Т. 2.; Ч. 2: Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А. С. Проников, У. И. Борисов, В. В. Бушуев и др.; Под общ. ред. А.С. Проникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1995. 371 с.
73. Проников А. С. Программный метод испытания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1985. 288 с.
74. Ратмиров В. А., Чурин И. Н., Шмутер С. А. Повышение точности и производительности станков с программным управлением. М.: Машиностроение, 1970. 343 с.

75. Ратмиров В. А. Основы программного управления станками. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
76. Решетов Д. Н., Портман В. Т. Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. 336 с.
77. РМГ 29-99 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения» (взамен ГОСТ 16263-70 и МИ 2247-93).
78. Руководство по эксплуатации лазерного интерферометра ML10 / Laser system manual; On-line instruction for ML10, EC10, Laser10 software and system accessories: Renishaw plc, Version 6. January 2002.
79. Руководство по эксплуатации прибора оценки точности отработки окружности / QC 10 ballbar user guide; Ballbar 5 YPS software: Renishaw plc, Version 5.06.
80. Прибор – Контурограф Mar Surf XC-10 // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mahr.com/index.php?NodeID=2698>. (дата обращения: 23.03.2012).
81. Саламандра Б. Л. Определение оптимальных параметров станка для приближённой обработки деталей сложной формы: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1970. 140 с.
82. Саламандра Б. Л., Серков Н. А. К оценке эффективности систем повышения точности обработки на металлорежущих станках // Машиноведение. 1972. № 5. С. 23-30.
83. Сергеев В. И. Основы инструментальной точности электромеханических цепей. М.: АН СССР, 1963. 248 с.
84. Серков Н. А. Исследование адаптивных способов коррекции программ для повышения точности обработки технологически нежестких деталей: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1972. 201 с.
85. Серков Н. А. Исследование способов коррекции программ управления станками, основанных на принципах адаптации // Станки и инструмент. 1973. № 3. С. 37-40.

86. Серков Н. А. К оценке потока информации при изготовлении детали на металлорежущем станке с ЧПУ // *Машиноведение*. 1975. №6. С. 17-22.
87. Серков Н. А. Классификация координатно-измерительных машин // *Оборудование с числовым программным управлением*. 1981. № 10. С. 8-10.
88. Серков Н. А. Измерение пространственно-сложных поверхностей на координатных измерительных машинах // *Станки и инструмент*. 1982. № 11. С. 20-24.
89. Серков Н. А. Применение координатных измерительных машин в автоматизированных комплексах машиностроения / Сб. *Диагностирование оборудования комплексно-автоматизированного производства*. М.: Наука, 1984. С. 15-21.
90. Серков Н. А. Экспериментальные исследования несущей системы станка-гексапода / Краткий отчет об основных результатах научно - исследовательской работы за 2007-2008 гг; Приложение к Научно-практическому журналу «*Качество: теория и практика*»; РАН; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова: М., 2008. С. 31-36.
91. Серков Н. А. Основные направления повышения точности металлорежущих станков // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2010. № 2. С. 26-35.
92. Серков Н. А. Первичные отклонения звеньев механизмов с поступательными и вращательными парами // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2011. № 2. С. 15-21.
93. Серков Н. А. Модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатного станка // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2011. № 3. С. 68-78.
94. Серков Н. А. Методы и средства измерений объёмной точности многокоординатных станков с ЧПУ // «*Вестник научно-технического развития*». 2012. № 3 (55). С. 26-46. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http:// www.vntr.ru](http://www.vntr.ru). (дата обращения: 23.03.2012).

95. Серков Н.А. Методы и средства измерения интегрального отклонения взаимного положения рабочих органов многокоординатных станков с ЧПУ // Проблемы машиностроения и автоматизации - 2012. - № 4. - С. 112-124.
96. Серков Н.А. Повышение инструментальной точности многокоординатных машин с ЧПУ методами коррекции первичных отклонений механизмов несущей системы. – В кн. Научные труды II международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», Москва. - 2012. – С. 400-405.
97. Серков Н. А. Вайнштейн И. В., Мерзляков А. А., Сироткин Р. О. Результаты экспериментальных исследований механизма параллельной структуры на примере станка «Гексамех-1» // «Вестник научно-технического развития». 2008. № 5(9). С. 30-44. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http:// www.vntr.ru](http://www.vntr.ru) (дата обращения: 05.06.2008).
98. Серков Н. А., Вайнштейн И. В., Мерзляков А. А., Сироткин Р. О. Экспериментальные исследования статических и динамических свойств станка-гексапода / Сб. трудов научной конференции, посвященной 70-летию Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН "Проблемы машиноведения" Москва, 12-14 ноября 2008 г.; М., 2008. С. 467-472
99. Серков Н.А., Защепин А.В. Современные средства измерения и диагностики при испытании станков на геометрическую точность / Сб. трудов научной конференции «Ориентированные Фундаментальные исследования РФФИ – Федеральные целевые программы, наукоемкое производство»; Под ред. академика РАН К. В. Фролова. – М.: Эксподизайн, 2007. С. 302 – 305.
100. Серков Н. А., Мерзляков А. А. Экспериментальные исследования динамических свойств станка с параллельной кинематикой мод. «Гексамех-1» / Краткий отчет об основных результатах научно - исследовательской работы за 2005-2006 гг; Приложение к Научно-практическому журналу

- «Качество: теория и практика»; РАН; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова: М., 2006. С. 63-68.
101. Серков Н. А., Мерзляков А. А. Способ оценки динамической податливости несущей системы станка / Сб. докладов Десятой сессии международной научной школы, посвященной памяти В. П. Булатова «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов, 24-28 октября, 2011 г., Санкт-Петербург». С. 127-129 // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ipme.ru/ipme/conf/VPB-11/VPB11.htm> (дата обращения: 23.03.2012).
102. Серков Н. А., Мерзляков А. А. Тестирование несущей системы машины силовым ступенчатым воздействием Сб. докладов: XI сессии международной научной школы "Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов" ВПБ-2013 (21-25 октября 2013 г., Санкт-Петербург, , С. 160-167 [Электронный ресурс] URL: http://www.ipme.ru/ipme/conf/VPB-13/SBOR_VPB13.pdf (дата обращения: 29.12.2013).
103. Серков Н. А., Мерзляков А. А., Сироткин Р. О., Орлова Г. Н. Устройство для измерения статической жесткости несущей системы машин-автоматов / Сб. научных трудов и инженерных разработок научной конференции «Ориентированные фундаментальные исследования – новые модели сотрудничества в инновационных процессах»; Под ред. Член-корр. РАН, академика РИА Б.В. Гусева. М.: Экспо дизайн – Холдинг, 2008. С. 195-198.
104. Серков Н.А., Мерзляков А.А., Никуличев И.В. Исследование и оценка жесткости многокоординатных машин с ЧПУ по отклику на силовое ступенчатое воздействие. – В кн. Научные труды II международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», Москва. – 2012. – С. 406-411.
105. Серков Н. А., Никуличев И. В. Методы и средства измерения первичных отклонений механизмов многокоординатных станков с ЧПУ //

- «Вестник научно-технического развития». 2012. № 2(54). С. 30-44. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.vntr.ru> (дата обращения: 19.02.2012).
106. Серков Н.А., Никуличев И.В. Методы и средства измерения первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоординатных станков с ЧПУ // Проблемы машиностроения и автоматизации - 2012. - № 2. - С. 43-51.
107. Серков Н. А., Пан Е. И. Об одном методе коррекции пространственной конфигурации трубки // Машиноведение. 1985. №4. С. 42-48.
108. Серков Н. А., Пан Е. И. Способ гибки трубок по эталону и стапелю на станках с ЧПУ / Авт. свид. №1250350. Б.И. № 30. 1986.
109. Серков Н. А., Постонен У. М. Устройство коррекции траектории движения режущего инструмента / Авт. свид. 319388 Б.И. N26. 1971.
110. Серков Н. А., Сироткин Р. О. и Мерзляков А. А. Некоторые результаты экспериментальных исследований платформы Гауфа – Стюарта на примере несущей системы станка «Гексамех-1» / Сб. трудов XV Симпозиума: «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем; Под ред. В. К. Асташева, В. Л. Крупенина, Е. Б. Семеновой. Москва-Звенигород, 2009. С. 316-322.
111. Серков Н. А., Шлесберг И. С., Никуличев И. В. Особенности построения 5 координатных станков с ЧПУ / Сб. трудов Международной научно-практической конференции: «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении». М.: Машиностроение, 2010. С. 95-102.
112. Серков Н. А., Шлесберг И. С. «Программа для расчета суммарного отклонения взаимного расположения исполнительных органов 5 координатного станка с поворотными столами». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616802, дата регистрации 22 июля 2013.

113. Серков Н.А., Шлесберг И.С., Мерзляков А. А., Никуличев И. В. Экспериментальные исследования статической жесткости 5 координатного станка с глобусным столом// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 6. С.90-95 .
114. Сироткин Р. О. Экспериментальное исследование статических и динамических свойств механизма параллельной структуры на примере несущей системы станка — гексапода: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 149 с.
115. Система измерительная портативная с индуктивным преобразователем БВ-6436 / Проспект ОАО «НИИ измерения» // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: http://www.micron.ru/production/universal_instruments/bv-6436/. (дата обращения: 23.03.2012).
116. Соколовский А. П. Жесткость в технологии машиностроения. М.- Л. Машгиз, 1946, 207 с.
117. Стародубов В. С. Способы снижения тепловыделений и температурных деформаций в металлорежущих станках с ЧПУ // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2007. №5. С. 32-39.
118. Теоретическая механика / Механика материальной системы и твердого тела; Часть 2; И. Д. Жонголович, А. Я. Лисютин, Н. В. Розе; Под ред. проф. Н. В. Розе. Л. – М.: Государственное технико-теоретическое издательство, 1933. 428 с.
119. Теория автоматического управления: Учеб. для ТЗЗ вузов по спец. «Автоматика и телемеханика»; В 2-х ч.; Ч. I.: Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.; Под ред. А. А. Воронова. М.: Высшая школа, 1986. 367 с.
120. Тимофеев Б. П. Точная механика. Современные проблемы. // Известия вузов. Приборостроение, 1998. Т. 41. № 1-2. С.73-84.
121. Точность и производственный контроль в машиностроении: Справочник / И. И. Балонкина, А. К. Кутай, Б. М. Сорочкин, Б. А. Тайц. Л.: Машиностроение, 1983. 386 с.

122. Трошенский С. П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках. М., «Машиностроение», 1964. 203 с.
123. Шалобаев Е. В. Теоретические и практические проблемы развития мехатроники [Электронный ресурс]. URL: <http://ysa.ifmo.ru/data/publications/BOOK004/paper013.pdf> (дата обращения: 10.12.2013).
124. Федотёнок А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1970. 408 с.
125. Фундаментальные проблемы теории точности / Ред. В. П. Булатов, И. Г. Фридлиндер ; Ин-т проблем машиноведения Рос. акад. наук . – М. : Наука, 2001 . – 504 с.
126. Цуккерман С. Т. Точные механизмы. М.: Оборонгиз, 1941. 304 с.
127. Чернянский П. М. Основы проектирования точных станков. Теория и расчет: Учебное пособие. М.: КНОРУС, 2010. 240 с.
128. Abderrahim M., Khamis A., Garrido S., Moreno L. Accuracy and Calibration Issues of Industrial Manipulators P. // Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications / Edited by Low Kin Huat; ISBN 3-86611-286-6. ARS/pIV, Germany: 2006. December. 702 p.
129. Andolfatto L., Lavernheb S., Mayera J.R.R. Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five axis high-speed machine tool // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2011. [Volume 51, Issues 10–11](#), Pages 787–796
130. Accuracy Drives Machine Tools // American Machinist. 2007. V. 21. № 12. [Электронный ресурс]. URL: <http://americanmachinist.com/machining-cutting/accuracy-drives-machine-tools> (дата обращения: 06.11.2016).
131. Adaptive Robot Control (ARC) / Система управления промышленным роботом с использованием измерительного прибора K-Series ф. Nikon Metrology Europe NV // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL:

- http://www.nikonmetrology.com/ru_EU/Produkt/Portativnye-izmeritel-nye-ustrojstva/Opticheskaya-KIM/Opticheskaya-KIM-K-Series (дата обращения: 06.11.2016).
132. Astanin V., Bogachev J., Duyunov A., Smotritsky G., Usov V. Hexamech-1 machining centre for aerospace industry / The 4th Chemnitz Parallel Kinematic Seminar 2004; April 20-21; Conference Proceedings. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2004. P. 641-651.
 133. Balsamo A., Franke M., Trapet E., Waldele F., De Jonge L. and Vanherck P. Results of the CIRP - Euromet Intercomparison of Ball Plate-Based Techniques for Determining CMM Parametric Errors // CIRP Annals. 1997. V. 46. № 1 P. 463-466.
 134. Benes J. Five-axis Accuracy. A quick, easy-to-use technique accurately analyzes 5-axis errors // American Machinist. 2009. February. P. 43-44.
 135. Bringmann B. and Knapp W. Model-based "Chase-the-Ball" Calibration of a 5-Axes Machining Center // Annals of the CIRP. 2006. V. 55 № 1 P. 531-534.
 136. Bryan J. International Status of Thermal Error Research // CIRP Annals. 1990. Vol. 39. № 2. P. 645-656.
 137. Bryan J. B. A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools. Parts I & II // Precision Engineering. 1982 V.4 № 2. P. 61-69; Precision Engineering, 1982. V. 4 № 3. P. 125-138.
 138. Canning J. S., Ziegert J., and Schmitz T., , Uncertainty of Spatial Coordinate Measurements Using Trilateration // Transactions of NAMRI/SME. 2005. V. 33. P. 121-128.
 139. Canning J. S., John C., Ziegert J., Tony L., Schmitz T. Coordinate metrology uncertainty using parallel kinematic techniques // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2007. V. 47. March. P. 658-665.
 140. CenterMax navigator / Цеховая измерительная машина ф. Carl Zeiss // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/systeme/fertigungsmessgeraete/centermax.html>. (дата обращения: 06.11.2016).

141. 3D-Taster Digital / Проспект измерительной головки ф. Haimer GmbH // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.haimer.de/produkte/messgeraete/taster/3d-taster/3d-taster-digital/3d-taster-digital.html> (дата обращения: 06.11.2016).
142. Denavit J. & Hartenberg, R. S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME. 1955. V. 77, P. 215-221.
143. Donmez, M., Blomquist, D., Hocken, R., Liu, C. and Barash, M. A General Methodology for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error Compensation. Precision Engineering. 1986. V. 8. № 4. P. 187-196.
144. Electronic levels EMP-832P-50-W2 / Проспект ф. Mahr Federal, Inc. // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cdiweb.com/datasheets/mahr/MahrFedElectronicLevels.pdf> (дата обращения: 06.11.2016).
145. Elton H. J., Munroe F. E. A numerically controlled measuring machine // Control. 1963. February. P. 71-75.
146. Eman K. F., Wu B. T., DeVries M. F. A Generalized Geometric Error Model for Multi-Axis Machines // CIRP Annals. 1987. V. 36. № 1. P. 253-256.
147. Ertl F. und Lenz K. J. Beschreibung und rechnerunterstützte Korrektur der Fehler von mehrachsigen Maschinen // Feinwerktechnik und Messtechnik. 1977. J. 85. № 6. S. 239-243.
148. Esteban, I.; Heisel, U.: Analysis of the Component Requirements and the Feasible Mechanical Properties of Hexapod Machine Tools. The 5th Chemnitz Parallel Kinematic Seminar 2006, April 25-26. Conference Proceedings. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2006, pp.97 – 113.
149. FaroArm® Fusion / Проспект измерительного робота антропоморфной конструкции ф. FARO Edge // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.faro.com/edge/us/resources>. (дата обращения: 06.11.2016).
150. Fassi I., Legnani G., Tosi D., Omodei A. Calibration of Serial Manipulators. P. 147-170 // Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications /

Edited by Low Kin Huat; ISBN 3-86611-286-6. ARS/pIV, Germany: 2006. December. 702 p.

151. Giriraj B., Gandhinadhan R., Prabhu Raja V., Vijayaraghavan T. Adaptive control in high speed machining for improved surface finish // Indian Journal of Engineering & Materials Sciencers Vol. 15, August 2008, pp. 311-316/
152. g-Mill 550 The ultra-dynamic machining center for 5-axis machining of blisks impellers, turbine blades and other complex parts / Проспект ф. LIECHTI ENGINEERING AG на станок мод. G_MILL550 // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.multistation.com/IMG/pdf/G-Mill550-02-BR-E.pdf>. (дата обращения: 23.03.2012).
153. Hongyao Shen, Jianzhong Fu, Yong He, Xinhua Yao. On-line Asynchronous Compensation Methods for static/quasi-static error implemented on CNC machine tools // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2012. V. 60. P. 11-26.
154. HiroakiIwai , KimiyukiMitsui. Development of a measuring method for motion accuracy of NC machine tools using links and rotary encoders // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2009. V. 49 P. 99–108.
155. Hocken R., Simpson J., Borchardt B., Lazar J., Reeve C. and Stein P. Three Dimensional Metrology // CIRP Annals. 1977. V. 26. № 2 P. 403-408.
156. Huang P., Whitehouse Dj. A Simple Yet Effective Approach for Error Compensation of a Tripod-Based Parallel Kinematic Machine // CIRP Annals. 2000 V. 49. № 1. P. 285-288.
157. Ibaraki Soichi, Matsubara Atsushi. On the magnification of two-dimensional contouring errors by using contour-parallel offsets // Precision Engineering. 2009 V. 33. № 4. P. 322-326.
158. Kevin McCarthy. Accuracy in positioning systems / Reprinted from The Motion Control Technology Conference Proceedings. 1991. March 19-21. [Электронный ресурс]. URL: <https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/McCarthy-1991.pdf> (дата обращения: 06.11.2016).

159. Kochsick M., Kunzman H., Lüdicke F. Entwicklung und Untersuchung eines inductiven Drei-Koordinaten-Wegaufnehmers // *Feinwerktechnik und Meßtechnik*. 1975. J. 83. № 5. S. 209-213.
160. Koichiro Iwasawa, Akito Iwama and Kimiyuki Mitsui. Development of a measuring method for several types of programmed tool paths for NC machine tools using a laser displacement interferometer and a rotary encoder // *Precision Engineering*. 2004 V. 28. № 4. P. 399-408.
161. Knapp W. Test of the Three-Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors // *CIRP Annals*. 1983. V. 32. № 1. P. 459-464.
162. Kulkarni Rajeev. Design and Evaluation of a Technique to Find the Parametric Errors of a Numerically Controlled Machine Tool Using a Laser Ball Bar: M.S. Thesis / University of Florida. Gainesville. FL., 1996.
163. Kwon H. D., Burdekinb M. Development and application of a system for evaluating the feed-drive errors on computer numerically controlled machine tools // *Precision Engineering*. 1996. V. 19. № 2-3. P. 133-140.
164. LaserTRACER - Sub- μm im Raum messen / прибор для измерения отклонений от траектории движения в пространстве ф. ETALON AG // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.etalon-ag.com>. (дата обращения: 25.03.2012).
165. Legnani G., Tosi D., Adamini R., Fassi I. Calibration of Parallel Kinematic Machines: Theory and Applications. P. 172-194 // *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications* / Edited by Low Kin Huat; ISBN 3-86611-286-6. ARS/plV, Germany: 2006. December. 702 p.
166. Lei W. T., Hsu Y. Y. Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part I: design and modeling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. V. 42, № 10. P. 1153-1162.
167. Lei W. T., Hsu Y. Y.: Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part II: errors estimation // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002. V. 42. № 10. P. 1163-1170

168. Leica Absolute Tracker / прибор для измерения отклонений от траектории движения в пространстве ф. Leica Geosystems AG (Switzerland) // [сайт] [Электронный ресурс]. URL: http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-Absolute-Tracker-AT401_81625.htm. (дата обращения: 25.03.2012).
169. Lim H. S., Son S. M., Wong Y. S. and Rahman M. Development and evaluation of an on-machine optical measurement device // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007. V. 47. № 10. P. 1556-1562.
170. Longstaff Andrew P., Fletcher Simon and Myers Alan. Volumetric compensation for precision manufacture through a standard CNC controller // [сайт] [Электронный ресурс]. URL: http://www.aspe.net/publications/Annual_2005/POSTERS/2EQUIP/2CTRL/1759.PDF (дата обращения: 9.12.2012).
171. Machine Tool Calibration; MT-Check; Spindle Error Analyzer / Проспект ф. IBS Precision Engineering // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ibspre.com>. (дата обращения: 23.03.2012).
172. McKeown P. A., Loxham J. Some Aspects of The Design of High Precision Measuring Machines // Annals of the CIRP. 1973. V. 22. № 1 P. 139-140.
173. Measuring Systems for Inspecting Linear Axes KGM 181 and KGM 182 Grid Encoders / Проспект прибора для измерения отклонений воспроизведения траектории в плоскости ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: http://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/208871-28_Measuring_Devices_For_Machine_Tool_Inspection_and_Acceptance_Testing.pdf (дата обращения: 06.11.2016).
174. Milling spindle CS-16-170 / Проспект электрошпинделя мод. CS – 16-170 ф. CyTec Zylindertechnik GmbH // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cytecsystems.de/cytecsystems/english/index.htm>. (дата обращения: 23.03.2012).

175. Neubert, A, Hirsch A. Beurteilung des statischen Verformungsverhaltens und der geometrischen Genauigkeit von Konsolfräsmaschinen. Maschinenbau-technik, Berlin 32 (1983), s. 269 – 275.
176. OPTODYNE's LB-500 Laser/Ballbar / Прибор для измерения отклонений воспроизведения «плоской» траектории ф. Optodyne, Inc. // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.optodyne.com/opnew5/products/qc500.html> (дата обращения: 06.11.2016).
177. Petru F. Valasek M. Concept, Design Evaluated Properties of TRIJOINT 900H / Conference Proceedings “The 4th Chemnitz Parallel Kinematic Seminar, 2004, April 20-21”. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2004. P. 569-583.
178. Ramesh R., Mannan M.A., Poo A.N. Error compensation in machine tools — a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2000. V. 40. July. I. 9. P. 1235-1384.
179. Santolaria J., Aguilar J.J., Yagüe J.A. & Pastor J. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines // Precision Engineering. 2008. V. 32. № 4. P. 251-268.
180. Sartori, S. and Zhang, G. Geometric Error Measurement and Compensation of Machines // CIRP Annals. 1995. V. 44. № 2. P. 599-609.
181. Schellekens P., Rosielle N., Vermeulen H., Vermeulen M., Wetzels S. and Pril W. Design for Precision: Current Status and Trends // CIRP Annals. 1998. V. 47. № 2. P. 557-586.
182. Schmitz T. and Ziegert J. Premachining CNC Contour Validation // Precision Engineering. 1998. V. 22. № 1, P. 10-18.
183. Schmitz T. and Ziegert J. Dynamic evaluation of spatial CNC contouring accuracy // Precision Engineering. 2000. V. 24. № 2. P. 99-118.

184. 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. P. 660-675.
185. Schultschik, R. The Components of Volumetric Accuracy // CIRP Annals. 1977. V. 26. № 1. P. 223-228.
186. Schultschik R. The Accuracy of Machine Tools Under Load Conditions // CIRP Annals. 1979. V. 28. № 1. P. 334-339.
187. SINUMERIK 840D/840Di/810D / Extended Functions. 840D_FB2.pdf // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL:http://electronica.li2.uchile.cl/new/documentacion/CNC/Sinumerik%20840%20Di/840D_FB2%20Description%20of%20Functions%20-%20Part%202.pdf. (дата обращения: 06.11.2016).
188. Sirotkin R., Serkov N. Experimental Researches of Accuracy, Rigidity and dynamic Properties – 5-axis Machining Centre Hexamech-1 / Conference Proceedings “The 5th Chemnitz Parallel Kinematic Seminar, 2006, April 25-26”. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten. 2006. P. 813-827.
189. Soons J., Theuws F. and Schellekens P. Modeling the Errors of Multi-Axis Machines: a General Methodology // Precision Engineering. 1992. V. 14. № 1. P. 5-19.
190. Spur G., Hoffmann E., Paluncic Z., Benzinger K. and Nymoen H. Thermal Behavior Optimization of Machine Tools // CIRP Annals. V. 37. № 1, P. 401-405.
191. Svoboda O. Testing the diagonal measuring technique // Precision Engineering. 2006. V. 30/ № 2. P. 132–144.
192. Taniguchi, N. Current status in and future trends of ultra-precision machining and ultra fine materials processing // Annals of the CIRP. 1983. V. 32. № 2. P. 573-582.
193. Trapet E., Wäldele F. A Reference Object Based Method to Determine The parametric Error Components of Coordinate Measuring Machines and Machine Tools // Measurement. 1991. № 9. P. 17-22.

194. Wang Ch. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. V. 71. № 10 P. 3933 – 3937.
195. XD LASER MEASUREMENT SOLUTION // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.apisensor.com/xd-laser>. (дата обращения: 06.11.2016).
196. Yang S., Yuan J., Ni J. Real-time cutting force induced error compensation on a turning center // *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 1997. V. 37. November. I. 11. P. 1597-1610.
197. Yuan J., Ni J. The real-time error compensation technique for CNC machining systems // *Mechatronics.* 1998. V. 8. June. I. 4. P. 359–380.
198. Zhang G. X., Zang Y. F. A Method for Machine Geometry Calibration Using 1-D Ball Array // *Annals of the CIRP.* 1991. V. 40. № 1. P. 519-522.
199. Zhang G., et al. Error Compensation of Coordinate Measuring Machines // *Annals of the CIRP.* 1985. V. 34. № 1. P. 445-448.
200. Zhang G., Ouyang R., Lu B., Hocken R., Veale R. and Donmez A. A Displacement Method for Machine Geometry Calibration // *CIRP Annals.* 1988. V. 37. № 1. P. 515-518.
201. Ziegert, J.C. and Mize, C.D. Laser Ball Bar: A Precision Instrument for Machine Tool Metrology. *Precision Engineering*, Volume 16, Issue 4, October 1994, Pages 259-267.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1

```

%psd0.m      суммарное отклонение для 5 координатного станка мод MC - 300
kr=.00000484813681109536;% коэф-т перевода угл. сек в радианы.
%kr=2*pi/(360*60*60);
format long
PADI = zeros(360,5);
PAZI = zeros(360,5);
%=====
%      Задание траектории движения инструмента
%      (точки обхода), окружность R =150 мм, с шагом 1 градус
%=====
por=361; r=150;
for i=1:361
    xk(i)=-200+r*sin((i-1)*2*pi/360); %координата x i-й точки контура обработки в
%неподвижной (абсолютной)системе координат)
    yk(i)=-150+r*cos((i-1)*2*pi/360); %координата y i-й точки контура обработки
%в неподвижной (абсолютной)системе координат)
    xr(i)=r*cos((i-1)*2*pi/360);
    yr(i)=r*sin((i-1)*2*pi/360);
end
zk=xk;
%input_num = 0;
    for k=1:2
        if k==1
            %=====
            %      Информация о первичных
            %      отклонениях основных механизмов
            %      идеального станка
            %=====

            %-----
            %      Информация о первичных отклонениях для
            %      шпиндельной бабки
            %-----

zi=0:-10:-310;      % шаг позиционирования по оси Z, мм
dz_z=[.000,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0];
% отклонение позиционирования по Z, мм
dz_z(:)=dz_z(:)*1;      % масштаб отклонений позиционирования вдоль оси Z
jj=0:180/31:180;      % шаг задания отклонения от прямолинейности
%перемещения стойки в плоскости 'xz'и 'yz', град.
ax_z=0.0;      % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок в
%плоскости XZ, мм (отклонение в виде полуволны синусоиды, шаг в градусах)
dx_z=ax_z*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения
%стойки в плоскости XZ, мм
ay_z=0.0;      % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок в
%плоскости YZ, мм (отклонение в виде полуволны синусоиды, шаг в градусах)
dy_z=ay_z*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения
%стойки в плоскости YZ, мм
aFI_z=0.0;      % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси X, угл. сек

```



```

dx_z=ax_z*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки в плос-
%кости XZ, мм
ay_z=0.0; % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок в
%плоскости YZ, мм (отклонение в виде полуволны %синусоиды, шаг в градусах)
dy_z=ay_z*sin(jj*pi/180); % отклонение от прямолинейности перемещения
%стойки в плоскости YZ, мм
aFI_z=0.0; % амплитуда отклонения угла поворота вокруг оси X, %угл. сек
dFI_z=aFI_z*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угла поворота вокруг оси X, %радианы
aPI_z=0.0; % амплитуда отклонения угла поворота вокруг оси Y, %угл. сек
dPI_z=aPI_z*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угла поворота вокруг оси Y, %радианы
aTT_z=0.0; % амплитуда отклонения угла поворота вокруг оси Z, %угл. сек
dTT_z=aTT_z*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угла поворота вокруг оси Z, %радианы
TETSyz=0.0; % отклонение от перпендикулярности в пл. YZ,
%движение шпиндельной бабки в угл. сек
TETSxz=0.0; % неперпендикулярности в пл. XZ, движение
%шпиндельной бабки в угл. сек
TETRyz=TETSyz*kr; % неперпендикулярности в пл. YZ в радианах
TETRxz=TETSxz*kr; % неперпендикулярности в пл. XZ в радианах
%-----
%
% Информация о первичных отклонениях для Стойки
%
%-----
yi=0:-10:-320; % шаг позиционирования по оси Y, мм

dy_y=[.000,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0];
% отклонение позиционирования по Y, мм
dy_y(:)=dy_y(:)*1; % масштаб отклонений позиционирования вдоль %оси Y
jj=0:180/32:180; % шаг задания отклонения от прямолинейности
%перемещения стойки в плоскости XY и ZY, град.
ax_y=0.0; % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок в
%плоскости XY, мм (отклонение в виде полуволны синусоиды, шаг в град.)
dx_y=ax_y*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки в
%плоскости XY, мм
az_y=0.0; % амплитуда отклонения от прямолинейности %перемещения салазок в
плоскости 'zy', мм (отклонение в виде полуволны %синусоиды, шаг в град.)
dz_y=az_y*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки в
%плоскости ZY, мм
aFI_y=0.0; % амплитуда отклонения угла поворота вокруг оси X, угл. сек
dFI_y=aFI_y*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угла поворота вокруг оси X, радианы
aPI_y=0.0; % амплитуда отклонения угла поворота вокруг оси Y, угл. сек
dPI_y=aPI_y*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угла поворота вокруг оси Y, радианы
aTT_y=0; % амплитуда отклонения угла поворота вокруг оси Z, угл. сек
dTT_y=aTT_y*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угла поворота вокруг оси Z, радианы
TETSxy=0.0; % неперпендикулярность в пл. XY в угл. сек
TETRxy=TETSxy*kr; % неперпендикулярность в пл. XY в радианах

%-----
%
% Информация о первичных отклонениях для САЛАЗОК
%
%-----
xi=0:-10:-400; % шаг позиционирования по оси X, мм

```



```

%координат X1Y1Z1 с началом координат X2Y2Z2
x3=-1000; y3=-0; z3=100; O2O3=[x3
    y3
    z3
    1];% вектор, соединяющий начало
%координат X2Y2Z2 с началом координат X3Y3Z3
x4=0; y4=-200; z4=-400; O0O4=[x4
    y4
    z4
    1];% вектор, соединяющий начало
%координат X0Y0Z0 с началом координат X4Y4Z4
x5=0; y5=-200; z5=-400; O4O5=[x5
    y5
    z5
    1];% вектор, соединяющий начало
%координат X4Y4Z4 с началом координат X5Y5Z5
x6=0; y6=0; z6=-300; O3P6=[x6
    y6
    z6
    1];% вектор, соединяющий начало
%координат X3'Y3'Z3'(идеальной)с точкой P, находящейся на режущем %инструменте.
x7=0; y7=0; z7=-300; O5Pp3=[x6
    y6
    z6
    1];% вектор, соединяющий начало
%координат X5'Y5'Z5'(идеальной)с точкой P, находящейся на режущем %инструменте.

%=====
%          Вычисление интегрального
%          отклонения для pi - точки (xi,yi, zi)
%=====
for i=1:361
ddx_x(i)= interp1(xi,dx_x,xk(i),'linear');% линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении позиционирования по 'X'
ddy_x(i)= interp1(xi,dy_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении прямолинейности при движении по Xв пл. XY
ddz_x(i)= interp1(xi,dz_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении прямолинейности при движении по Yв пл. ZX
ddFI_x(i)=interp1(xi,dFI_x,xk(i),'linear');% линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении поворота вокруг оси Xпри движении по X
ddPI_x(i)=interp1(xi,dPI_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении поворота вокруг оси Y при %движении по X
ddTT_x(i)=interp1(xi,dTT_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция %промежуточной точ-
ки в отклонении поворота вокруг оси 'z' при %движении по 'x'
ddx_y(i)= interp1(yi,dx_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении прямолинейности при движении по Yв пл. XYd-
dy_y(i)= interp1(yi,dy_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении позиционирования по Y
ddz_y(i)= interp1(yi,dz_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении прямолинейности при движении по Yв пл. ZY
ddFI_y(i)=interp1(yi,dFI_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении поворота вокруг оси X при движении по Y
ddPI_y(i)=interp1(yi,dPI_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция

```

```

%промежуточной точки в отклонении поворота вокруг оси Y при движении по Y
ddTT_y(i)=interp1(yi,dTT_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении поворота вокруг оси Z при движении по Y
ddx_z(i)=interp1(zi,dx_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении прямолинейности при движении по Z в пл. ZX
ddy_z(i)=interp1(zi,dy_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении прямолинейности при движении по Y в пл. ZY
ddz_z(i)=interp1(zi,dz_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении позиционирования по Z
ddFI_z(i)=interp1(zi,dFI_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении поворота вокруг оси X при движении по Z
ddPI_z(i)=interp1(zi,dPI_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении поворота вокруг оси Y при движении по Z
ddTT_z(i)=interp1(zi,dTT_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении поворота вокруг оси Z при движении по Z
a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x1+ddx_x(i);
a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y1+ddy_x(i);
a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z1+ddz_x(i);
a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14
      a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
      a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
      a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(ddFI_x(i)); a2a23=-sin(ddFI_x(i)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(ddFI_x(i)); a2a33=cos(ddFI_x(i)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
      a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
      a2a31, a2a32, a2a33, a2a34
      a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(ddPI_x(i)); a3a12=0; a3a13=sin(ddPI_x(i)); a3a14=0;
a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(ddPI_x(i)); a3a32=0; a3a33=cos(ddPI_x(i)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
      a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
      a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
      a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(ddTT_x(i)); a4a12=-sin(ddTT_x(i)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(ddTT_x(i)); a4a22=cos(ddTT_x(i)); a4a23=0; a4a24=0;
a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
      a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
      a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
      a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
A01 = A1A*A2A*A3A*A4A;
a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x2+ddx_y(i); %AO3I(i)=AO3
a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y2+ddy_y(i);
a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z2+ddz_y(i);
a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14

```

```

a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(ddFI_y(i)); a2a23=-sin(ddFI_y(i)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(ddFI_y(i)); a2a33=cos(ddFI_y(i)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
a2a31, a2a32, a2a33, a2a34
a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(ddPI_y(i)); a3a12=0; a3a13=sin(ddPI_y(i)); a3a14=0;
a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(ddPI_y(i)); a3a32=0; a3a33=cos(ddPI_y(i)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(ddTT_y(i)); a4a12=-sin(ddTT_y(i)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(ddTT_y(i)); a4a22=cos(ddTT_y(i)); a4a23=0; a4a24=0;
a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
a5a11=cos(TETRxy); a5a12=-sin(TETRxy); a5a13=0; a5a14=0;
a5a21=sin(TETRxy); a5a22=cos(TETRxy); a5a23=0; a5a24=0;
a5a31=0; a5a32=0; a5a33=1; a5a34=0;
a5a41=0; a5a42=0; a5a43=0; a5a44=1;
A5A=[a5a11, a5a12, a5a13, a5a14
a5a21, a5a22, a5a23, a5a24
a5a31, a5a32, a5a33, a5a34
a5a41, a5a42, a5a43, a5a44];
A12 = A1A*A2A*A3A*A4A*A5A;
a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x3+ddx_z(i);
a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y3+ddy_z(i);
a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z3+ddz_z(i);
a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14
a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(ddFI_z(i)); a2a23=-sin(ddFI_z(i)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(ddFI_z(i)); a2a33=cos(ddFI_z(i)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
a2a31, a2a32, a2a33, a2a34
a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(ddPI_z(i)); a3a12=0; a3a13=sin(ddPI_z(i)); a3a14=0;

```

```

a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(ddPI_z(i)); a3a32=0; a3a33=cos(ddPI_z(i)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
      a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
      a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
      a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(ddTT_z(i)); a4a12=-sin(ddTT_z(i)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(ddTT_z(i)); a4a22=cos(ddTT_z(i)); a4a23=0; a4a24=0;
a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
      a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
      a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
      a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
a5a11=cos(TETRxz); a5a12=0; a5a13=sin(TETRxz); a5a14=0;
a5a21=0; a5a22=1; a5a23=0; a5a24=0;
a5a31=-sin(TETRxz); a5a32=0; a5a33=cos(TETRxz); a5a34=0;
a5a41=0; a5a42=0; a5a43=0; a5a44=1;
A5A=[a5a11, a5a12, a5a13, a5a14
      a5a21, a5a22, a5a23, a5a24
      a5a31, a5a32, a5a33, a5a34
      a5a41, a5a42, a5a43, a5a44];
a6a11=1; a6a12=0; a6a13=0; a6a14=0;
a6a21=0; a6a22=cos(TETRyz); a6a23=-sin(TETRyz); a6a24=0;
a6a31=0; a6a32=sin(TETRyz); a6a33=cos(TETRyz); a6a34=0;
a6a41=0; a6a42=0; a6a43=0; a6a44=1;
A6A=[a6a11, a6a12, a6a13, a6a14
      a6a21, a6a22, a6a23, a6a24
      a6a31, a6a32, a6a33, a6a34
      a6a41, a6a42, a6a43, a6a44];
A23 = A1A*A2A*A3A*A4A*A5A*A6A;
fifi=0; % fifi=0 Выключение моделирования по угловым координатам, fifi=1 %- включение
      if fifi ==1
          for j=1
dfiI_fiI(j)= interp1(fiIj,dfiI_fiI,fiI(j),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении позиционирования по fiI
dy_fiI(j)= interp1(fiIj,dy_fiI,fiI(j),'linear'); % аксиальное биение корпуса планшайбы, мкм
dz_fiI(j)= interp1(fiIj,dz_fiI,fiI(j),'linear'); % радиальное биение корпуса
%плпншайбы в направлении оси Z, мкм
dx_fiI(j)= interp1(fiIj,dx_fiI,fiI(j),'linear'); % радиальное биение корпуса
%плпншайбы в направлении оси X, мкм
dpsiyox_fiI(j)=interp1(fiIj,dpsiyox_fiI,fiI(j),'linear');% отклонения (разворота)
%оси В (корпуса планшайбы) в пл. YOХ (ЕСВ), угловые секунды
dpsiyoz_fiI(j)=interp1(fiIj,dpsiyoz_fiI,fiI(j),'linear');% отклонения (разворота)
%оси В (корпуса планшайбы) в пл. YOZ (ЕАВ), угловые секунды
dfiII_fiII(j)= interp1(fiIIj,dfiII_fiII,fiII(j),'linear');%линейная интерполяция
%промежуточной точки в отклонении позиционирования по fiII
dy_fiII(j)= interp1(fiIIj,dy_fiII,fiII(j),'linear'); % аксиальное биение планшайбы, мкм
dz_fiII(j)= interp1(fiIIj,dz_fiII,fiII(j),'linear'); % радиальное биение плпншайбы в направ-
лении оси X, мкм
dx_fiII(j)= interp1(fiIIj,dx_fiII,fiII(j),'linear'); % радиальное биение плпншайбы в направ-
лении оси Y, мкм

```

```

dpsiyox_fiII(j)=interp1(fiIIj,dpsiyox_fiII,fiII(j),'linear');% отклонения (разворота) оси С
%(планшайбы) в пл. YOZ (EAC), угловые секунды
dpsiyoz_fiII(j)=interp1(fiIIj,dpsiyoz_fiII,fiII(j),'linear');% отклонения (разворота) оси С
%(планшайбы) в пл. XOZ (EBC), угловые секунды
a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x4+dx_fiI(j);
a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y4+dy_fiI(j);
a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z4+dz_fiI(j);
a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14
      a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
      a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
      a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(dpsiyoz_fiI(j)); a2a23=-sin(dpsiyoz_fiI(j)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(dpsiyoz_fiI(j)); a2a33=cos(dpsiyoz_fiI(j)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
      a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
      a2a31, a2a32, a2a33, a2a34
      a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(dfiI_fiI(j)); a3a12=0; a3a13=sin(dfiI_fiI(j)); a3a14=0;
a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(dfiI_fiI(j)); a3a32=0; a3a33=cos(dfiI_fiI(j)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
      a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
      a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
      a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(dpsiyox_fiI(j)); a4a12=-sin(dpsiyox_fiI(j)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(dpsiyox_fiI(j)); a4a22=cos(dpsiyox_fiI(j)); a4a23=0; a4a24=0;
a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
      a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
      a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
      a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
a5a11=1; a5a12=0; a5a13=0; a5a14=0;
a5a21=0; a5a22=cos(TETR1yz); a5a23=-sin(TETR1yz); a5a24=0;
a5a31=0; a5a32=sin(TETR1yz); a5a33=cos(TETR1yz); a5a34=0;
a5a41=0; a5a42=0; a5a43=0; a5a44=1;
A5A=[a5a11, a5a12, a5a13, a5a14
      a5a21, a5a22, a5a23, a5a24
      a5a31, a5a32, a5a33, a5a34
      a5a41, a5a42, a5a43, a5a44];
a6a11=cos(TETR1xy); a6a12=-sin(TETR1xy); a6a13=0; a6a14=0;
a6a21=sin(TETR1xy); a6a22=cos(TETR1xy); a6a23=0; a6a24=0;
a6a31=0; a6a32=0; a6a33=1; a6a34=0;
a6a41=0; a6a42=0; a6a43=0; a6a44=1;
A6A=[a6a11, a6a12, a6a13, a6a14
      a6a21, a6a22, a6a23, a6a24
      a6a31, a6a32, a6a33, a6a34
      a6a41, a6a42, a6a43, a6a44];
A04 = A1A*A2A*A3A*A4A*A5A*A6A;

```



```

a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x5+dx_fiII(j)+dxCB;
a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y5+dy_fiII(j);
a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z5+dz_fiII(j)+dzCB;
a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14
      a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
      a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
      a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(dpsiyoz_fiII(j)); a2a23=-sin(dpsiyoz_fiII(j)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(dpsiyoz_fiII(j)); a2a33=cos(dpsiyoz_fiII(j)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
      a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
      a2a31, a2a32, a2a33, a2a34
      a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(dpsiyox_fiI(j)); a3a12=0; a3a13=sin(dpsiyox_fiI(j)); a3a14=0;
a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(dpsiyox_fiI(j)); a3a32=0; a3a33=cos(dpsiyox_fiI(j)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
      a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
      a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
      a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(dfiII_fiII(j)); a4a12=-sin(dfiII_fiII(j)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(dfiII_fiII(j)); a4a22=cos(dfiII_fiII(j)); a4a23=0; a4a24=0;
a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
      a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
      a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
      a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
a5a11=1; a5a12=0; a5a13=0; a5a14=0;
a5a21=0; a5a22=cos(TETR2yz); a5a23=-sin(TETR2yz); a5a24=0;
a5a31=0; a5a32=sin(TETR2yz); a5a33=cos(TETR2yz); a5a34=0;
a5a41=0; a5a42=0; a5a43=0; a5a44=1;
A5A=[a5a11, a5a12, a5a13, a5a14
      a5a21, a5a22, a5a23, a5a24
      a5a31, a5a32, a5a33, a5a34
      a5a41, a5a42, a5a43, a5a44];
a6a11=cos(TETR2xy); a6a12=-sin(TETR2xy); a6a13=0; a6a14=0;
a6a21=sin(TETR2xy); a6a22=cos(TETR2xy); a6a23=0; a6a24=0;
a6a31=0; a6a32=0; a6a33=1; a6a34=0;
a6a41=0; a6a42=0; a6a43=0; a6a44=1;
A6A=[a6a11, a6a12, a6a13, a6a14
      a6a21, a6a22, a6a23, a6a24
      a6a31, a6a32, a6a33, a6a34
      a6a41, a6a42, a6a43, a6a44];
A45 = A1A*A2A*A3A*A4A*A5A*A6A;
      end
      end
A03=A01*A12*A23;      % матрица для идеального станка X, Y, Z
if fifi==1

```

```

A05=A04*A45;          % матрица для идеального станка FI1, FI2
end
if k==2                % действительный станок
AA03=A03;              % матрица для действительного станка X, Y, Z
  if fifi==1
    A05=A04*A45;
    AA05=A05;          % матрица для действительного станка FI1, FI2
  end
  PAD=AA03*O3Pf3;
  PADI(i,1)=i;
  PADI(i,2)=PAD(1);
  PADI(i,3)=PAD(2);
  PADI(i,4)=PAD(3);
  PADI(i,5)=PAD(4);
end                    % конец цикла для действительного станка
                    end % конец цикла по i
PAZ=A03*O3Pf3;
PAZI(i,1)=i;
PAZI(i,2)=PAZ(1);
PAZI(i,3)=PAZ(2);
PAZI(i,4)=PAZ(3);
PAZI(i,5)=PAZ(4);
                    end % конец цикла по k
DPA(:,1)=PAZI(:,1);
DPA(:,2)=PADI(:,2)-PAZI(:,2);
DPA(:,3)=PADI(:,3)-PAZI(:,3);
DPA(:,4)=PADI(:,4)-PAZI(:,4);
for i=1:361
DPA(i,5)=DPA(i,2)*cos(pi*(i-1)/180);
DPA(i,6)=DPA(i,3)*sin(pi*(i-1)/180);
DPA(i,1),
DPA(i,2),
end
DPA(:,7)=DPA(:,5)+DPA(:,6);
for j=1:361*kd
  R(j)=1.5;
  R1(j)=1.;
  th(j)=pi*(j/kd-1)/180;
end
polar(th,R,'w-')
hold on
polar(th,R1,'r-')
km =5;
polar(th(:,1)+DPA(:,7)*km,'b-')
hold off

```

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2.**АКТ об использовании результатов докторской диссертационной работы
Серкова Николая Алексеевича**

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
НИАТ

127051, Москва, Петровка, 24
Тел.: (495)312-30-27, факс: (495)312-30-27

№ 1000/17-67 • “12” 11 2012 г.
На № _____ • “ ” 201__ г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ОАО «НИАТ»
д.т.н., профессор, Чл. - корр. РАН

“ ” _____



АКТ

об использовании результатов докторской диссертационной работы
Серкова Николая Алексеевича

Комиссия в составе:

председатель – Первый зам. генерального директора ОАО «НИАТ», к.т.н. Плихунов В.В.

члены комиссии: 1. Шеметов М.Г., к.т.н.,

2. Шлесберг И.С., начальник центра ТиОМО,

3. Комов Н.Е., к.т.н.,

4. Коваленко А.В., к.т.н.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ КОРРЕКЦИИ», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы в проектно-конструкторской, технологической и производственной деятельности Национального Института Авиационных Технологий:

1. При испытаниях на геометрическую точность, статическую и динамическую жесткость, виброустойчивость 1) станка-гексапода мод. «Гексамех-1», 2) 5 координатного станка с ЧПУ мод. МЦ -1, 3) 3 координатного высокоскоростного станка с вертикальным столом мод. ВСФП-1, 4) 5 координатного лазерного технологического комплекса ЛТК-3D. 5) 3 координатных станков мод. ФП-17 и мод. ФП-27.

2. При разработке и внедрении методик диагностики и калибровки точности при сборке и испытаниях следующего технологического оборудования: 1) 5 координатных станков с ЧПУ мод. МС – 300 и мод. МС – 700, 2) установки лазерного полирования на базе станка мод. МС – 300, 3) установок сварки в вакууме с ЧПУ мод. ЭЛУ – 08КП, 4) несущей системы установки дробеструйного формообразования УДФ, 5) 2 координатной установки для резки (раскрыя) материала жидкостью под высоким давлением.

3. При освоении методов измерения первичных отклонений механизмов несущей системы многокоординатных машин с ЧПУ с использованием измерительного оборудования ЦКП при ИМАШ РАН «Исследование и диагностика точности машин».

4. При разработке и изготовлении устройства для измерения отклонений от пересечения осей поворота угловых координат 5 координатных станков и освоении методики совмещения осей поворота столов на станках мод. МС 300 и МС 700.

Использование результатов диссертационной работы позволяет: 1) повысить качество проектирования и изготовления многокоординатных машин с ЧПУ (проведение калибровки с использованием цифровой коррекции позволяет повысить геометрическую точность 5 координатного станка с ЧПУ в среднем на 50%); 2) сократить затраты и повысить производительность труда при проведении натуральных испытаний многокоординатного технологического оборудования примерно на 40%; 3) сократить время сборки станка и, в частности, время юстировки 2 координатных поворотных столов более чем в 2 раза.

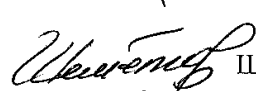
Результаты внедрялись при выполнении НИР и ОКР по темам:

1.	Изготовление пятикоординатных обрабатывающих центров модели МС-300	финансирование ОАО НИАТ	№ 5200
2.	Изготовление пятикоординатных обрабатывающих центров модели МС-700	финансирование ОАО НИАТ	№ 7293
3.	Изготовление и поставка заказчику установки ЭЛУ-08КП	хоз. договор	№ 8160
4.	Изготовление и поставка заказчику установки ЭЛУ-08КП-ИРЗ	хоз. договор	№ 1349
5.	Разработка технологических процессов и опытного образца установки для получения наноструктурированных поверхностей на сложнопрофильных деталях различного класса методами лазерно-плазменного полирования и структурирования поверхности	гос. контракт	№ ГК 1006
6.	Разработка и изготовление опытно-промышленного образца установки контактного типа для формообразования и зачистки длинномерных панелей	хоз. договор	№ 1387

Председатель комиссии

 Плихунов В.В.

Члены комиссии:

 Шеметов М.Г.

 Шлесберг И.С.

 Комов Н.Е.

 Коваленко А.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 3

```

%psd43.m          суммарное отклонение для 5 координатного станка
                  %мод МС 300 (линейные и угловые координаты)

clc
clear
krr=.00000484813681109536;   % коэф-т перевода угл. сек в радианы.
krr=pi/180;                  % коэф-т перевода угл. град в радианы
format long
PADI = zeros(60,5);          % координаты точки Р на режущем инструменте
для %действительного станка
PAZI = zeros(60,5);          % координаты точки Р на режущем инструменте для
идеального %станка
PBDI = zeros(60,5);          % координаты точки Р на обрабатываемой детали
для %действительного станка
PBZI = zeros(60,5);          % координаты точки Р на обрабатываемой
детали %(приспособление) для идеального станка
K = zeros(5,12);             % индикатор выхода точек обхода из рабочей зоны станка
e=zeros(1,41);               % коэффициенты "включения - выключения" первичных
отклонений                   %=====
=====
%                               Задание траектории движения
%                               инструмента и заготовки (точки
обхода)                       %=====
=====
vfi=0:30:360;
vpci=[30,0,-30,-60,-90];
H2=50;
H1=10;
RH2=120;
X0=-300;
Y0=-150;
Z0=-130;
for j=1:5
    for i=1:12
        vpcid(i) = atan(RH2*sin(krr*vfi(i))/H2);
        RB = sqrt((RH2*sin(krr*vfi(i)))^2+H2^2);
        xkk(i,j) = RB*sin(vpcid(i)+krr*vpci(j));
        ykk(i,j) = RH2*cos(krr*vfi(i));
        zkk(i,j) = RB*cos(vpcid(i)+krr*vpci(j));
        fil(i,j) = vpci(j);
        fiI(i,j) = vfi(i);
    end
end
xkk=-xkk+X0;
ykk=-ykk+Y0;
zkk=zkk+Z0;
for j=1:5
    for i=1:12
        if xkk(i,j) > 0
            K(j,i)=1;

```

```

elseif xkk(i,j) < -600
    K(j,i)=1;
    end
if ykk(i,j) > 0
    K(j,i)=1;
    elseif ykk(i,j) < -320
    K(j,i)=1;
    end
if zkk(i,j) > 0
    K(j,i)=1;
    elseif zkk(i,j) < -310
    K(j,i)=1;
    end
end
end
xkk1=xkk.';
ykk1=ykk.';
zkk1=zkk.';
plot3(xkk1,ykk1,zkk1)
pause
plot3(xkk,ykk,zkk)
grid on
axis square
xk=xkk;
yk=ykk;
zk=zkk;
e(1,1)=1;
e(1,2)=1;
e(1,3)=1;
e(1,4)=1;
e(1,5)=1;
e(1,6)=1;
e(1,7)=1;
e(1,8)=1;
e(1,9)=1;
e(1,10)=1;
e(1,11)=1;
e(1,12)=1;
e(1,13)=1;
e(1,14)=1;
e(1,15)=1;
e(1,16)=1;
e(1,17)=1;
e(1,18)=1;
e(1,19)=1;
e(1,20)=1;
e(1,21)=1;
e(1,22)=1;
e(1,23)=1;
e(1,24)=1;
e(1,25)=1;
e(1,26)=-1;

```

```

e(1,27)=1;
e(1,28)=1;
e(1,29)=-1;
e(1,30)=1;
e(1,31)=1;
e(1,32)=10;
e(1,33)=1;
e(1,34)=1;
e(1,35)=1;
e(1,36)=1;
e(1,37)=1;
e(1,38)=1;
e(1,39)=-1;
e(1,40)=1;
e(1,41)=1;
    for k=1:2
        if k==1
            %=====
            %          Информация о первичных
            %          отклонениях основных механизмов
            %          идеального станка
            %=====
            %-----
            %          Информация о первичных отклонениях для
            %          шпиндельной бабки
            %-----

zi=0:-10:-310;          % шаг позиционирования по оси 'z', мм
dz_z=[.000,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0,.0];
% отклонение позиционирования по z, мм
dz_z(:)=dz_z(:)*1;    % масштаб отклонений позиционирования вдоль оси 'z'
jj=0:180/31:180;      % шаг задания отклонения от прямолинейности
перемещения %стойки в плоскости 'xz' и 'yz', град.
ax_z=0.0;             % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок
в %плоскости 'xz', мм (отклонение в виде полуволны синусоиды, шаг в градусах)
dx_z=ax_z*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки
в %плоскости 'xz', мм
ay_z=0.0;             % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок
в %плоскости 'yz', мм (отклонение в виде полуволны синусоиды, шаг в градусах)
dy_z=ay_z*sin(jj*pi/180); % отклонение от прямолинейности перемещения стойки
в %плоскости 'yz', мм
aFI_z=0.0;            % амплитуда отклонения угла поворота вокруг оси 'x', угл. сек
dFI_z=aFI_z*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угла поворота вокруг оси 'x', радианы
aPI_z=0.0;            % амплитуда отклонения угла поворота вокруг оси 'y', угл. сек
dPI_z=aPI_z*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угла поворота вокруг оси 'y', радианы
aTT_z=0.0;            % амплитуда отклонения угла поворота вокруг оси 'z', угл. сек
dTT_z=aTT_z*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угла поворота вокруг оси 'z', радианы
TETSyz=0.0;           % отклонение от перпендикулярности в пл. YZ,
движение %шпиндельной бабки в угл. сек
TETSxz=0.0;           % неперпендикулярности в пл. XZ, движение

```

шпиндельной %бабки в угл. сек

TETRyz=TETSyz*kr; % неперпендикулярности в пл. YZ в радианах

TETRxz=TETSxz*kr; % неперпендикулярности в пл. XZ в радианах

%-----

%

% Информация о первичных отклонениях для Стойки

%

%-----

yi=0:-10:-320; % шаг позиционирования по оси 'y', мм

dy_y=[.000,.0];

% отклонение позиционирования по y, мм

dy_y(:)=dy_y(:)*1; % масштаб отклонений позиционирования вдоль оси 'y'

jj=0:180/32:180; % шаг задания отклонения от прямолинейности

перемещения %стойки в плоскости 'xu'и 'zy', град.

ax_y=0.0; % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок

в %плоскости 'xu', мм (отклонение в виде полуволны синусоиды, шаг в град.)

dx_y=ax_y*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки

в %плоскости 'xu', мм

az_y=0.0; % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок

в %плоскости 'zy', мм (отклонение в виде полуволны синусоиды, шаг в град.)

dz_y=az_y*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки

в %плоскости 'zy', мм

aFI_y=0.0; % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси 'x', угл. сек

dFI_y=aFI_y*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси 'x', радианы

aPI_y=0.0; % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси 'y', угл. сек

dPI_y=aPI_y*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси 'y', радианы

aTT_y=0; % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси 'z', угл. сек

dTT_y=aTT_y*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси 'z', радианы

TETSxy=0; % неперпендикулярность в пл. XY в угл. сек

TETRxy=TETSxy*kr; % неперпендикулярность в пл. XY в радианах

%-----

%

% Информация о первичных отклонениях для САЛАЗОК

%

%-----

xi=0:-10:-600; % шаг позиционирования по оси 'x', мм

dx_x=[.000,.0,

.0,.0];%

отклонение %позиционирования по x, мм

dx_x(:)=dx_x(:)*1; % масштаб отклонений позиционирования вдоль оси 'x'

jj=0:3:180; % шаг задания отклонения от прямолинейности перемещения стойки

в %плоскости 'xu'и 'zx', град.

au_x=0.0; % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок

в %плоскости 'ux', мм (отклонение в виде полуволны синусоиды, шаг в град.)

du_x=au_x*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки

в %плоскости 'ux', мм

az_x=0.0; % амплитуда отклонения от прямолинейности перемещения салазок

в %плоскости 'zx', мм (отклонение в виде полуволны синусоиды, шаг в град.)

dz_x=az_x*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки

в %плоскости 'zx', мм


```

dfiII_fiII(:)=dfiII_fiII(:)*1*kr; % масштаб отклонений позиционирования C, радианы
jj=0:2.5:180; % шаг задания отклонения аксиального и радиального
биения %планшайбы, град. (отклонение в виде полуволны синусоиды)
az_fiII=0.0; % амплитуда аксиального биения планшайбы, мкм
dz_fiII=az_fiII*sin(jj*pi/180); %аксиальное биение планшайбы, мкм
ax_fiII=0.0; % амплитуда радиального биения планшайбы в направлении
оси %X, мкм
dx_fiII=ax_fiII*sin(jj*pi/180); %радиальное биение планшайбы в направлении оси
X, %мкм
ay_fiII=0.0; % амплитуда радиального биения планшайбы в направлении
оси %Y, мкм
dy_fiII=ay_fiII*sin(jj*pi/180); % радиальное биение планшайбы в направлении оси
Y, %мкм
apsixoz_fiII=0.0; % амплитуда отклонения (разворота) оси C (планшайбы) в пл.
XOZ (ЕВС), угловые секунды
dpsixoz_fiII=apsixoz_fiII*kr*sin(jj*pi/180);%отклонения (разворота) оси C (планшайбы)
в %пл. XOZ (ЕВС), радианы
apsiyoz_fiII=0.0; % амплитуда отклонения (разворота) оси C (планшайбы) в пл.
YOZ (ЕАС), угловые секунды
dpsiyoz_fiII=apsiyoz_fiII*kr*sin(jj*pi/180);%отклонения (разворота) оси C (планшайбы)
в %пл. YOZ (ЕАС),
TETS2xy=0.0; % угол между осью O5Y5и осью O4Y4 в пл. XY, в угл. сек
TETR2xy=TETS2xy*kr; % угол между осью O5Y5и осью O4Y4 в пл. XY,
в %радианах
TETS2yz=0.0; % угол между осью O5Y5и осью O4Y4 в пл. YZ, в угл. сек
TETR2yz=TETS2yz*kr; % угол между осью O5Y5и осью O4Y4 в пл. YZ,
в %радианах
dxCB=0.0; %отклонение (смещение) оси C от номинальной
точки %пересечения осей C и B в пл XY (зеркало планшайбы), мкм
dzCB=0.0; %отклонение (смещение) оси C от номинальной
точки %пересечения осей C и B в пл ZY, мкм
else
%=====
%
% Первичные отклонения для действительного
%
станка %=====
=====
%-----
%
% Первичные отклонения для
% шпиндельной бабки
%
%-----

zi=0:-10:-310; % шаг позиционирования по оси 'Z', мм
dz_z=[.0,.0,-.001,-.001,-.001,-.002,-.002,-.003,-.003,-.002,-.003,-.003,-.004,-.004,-.004,-.004,-
.005,-.005,-.007,-.007,-.007,-.007,-.007,-.007,-.008,-.007,-.008,-.009,-.008,-.010,-.010,-.010];
% отклонение позиционирования по z, мм
dz_z(:)=dz_z(:)*e(1,1); % масштаб отклонений позиционирования вдоль оси 'z'
jj=0:180/31:180; % шаг задания отклонения от прямолинейности
перемещения %стойки в плоскости 'xz'и 'yz', град.

```

```

ax_z=0.005*e(1,2);           % амплитуда отклонения от прямолинейности
перемещения %салазок в плоскости 'xz', мм (отклонение в виде полуволны синусоиды,
шаг в градусах)
dx_z=ax_z*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки
в %плоскости 'xz', мм
ay_z=0.005*e(1,3);           % амплитуда отклонения от прямолинейности
перемещения %салазок в плоскости 'yz', мм (отклонение в виде полуволны синусоиды,
шаг в градусах)
dy_z=ay_z*sin(jj*pi/180); % отклонение от прямолинейности перемещения стойки
в %плоскости 'yz', мм
aFI_z=5.0*e(1,4);            % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси 'x', угл. сек
dFI_z=aFI_z*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси 'x', радианы
aPI_z=5.0*e(1,5);            % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси 'y', угл. сек
dPI_z=aPI_z*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси 'y', радианы
aTT_z=5.0*e(1,6);            % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси 'z', угл. сек
dTT_z=aTT_z*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси 'z', радианы
TETSyz=5.0*e(1,7);           % отклонение от перпендикулярности в пл.
YZ, %движение шпиндельной бабки в угл. сек
TETSxz=5.0*e(1,8);           % неперпендикулярности в пл. XZ,
движение %шпиндельной бабки в угл. сек
TETRyz=TETSyz*kr;            % неперпендикулярности в пл. YZ в радианах
TETRxz=TETSxz*kr;            % неперпендикулярности в пл. XZ в радианах

```

```

%-----
%
%   Информация о первичных отклонениях для Стойки
%
%-----

```

```

yi=0:-10:-320;           % шаг позиционирования по оси 'y', мм
dy_y=[.0,.0,.001,.001,.001,.0,.0,.0,.0,.0,.001,.001,.001,.001,.002,.002,.002,.003,.002,.003,.003,.0
03,.003,.004,.004,.004,.004,.005,.005,.005,.005,.005,.006]; % отклонение
позиционирования %по Y, мм
dy_y(:)=dy_y(:)*e(1,9);    % масштаб отклонений позиционирования вдоль оси Y
jj=0:180/32:180;           % шаг задания отклонения от прямолинейности
перемещения %стойки в плоскости XY и ZY, град.
ax_y=0.005*e(1,10);        % амплитуда отклонения от прямолинейности
перемещения %салазок в плоскости XY, мм (отклонение в виде полуволны синусоиды,
шаг в град.)
dx_y=ax_y*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки
в %плоскости XY, мм
az_y=0.005*e(1,11);        % амплитуда отклонения от прямолинейности
перемещения %салазок в плоскости ZY, мм (отклонение в виде полуволны синусоиды,
шаг в град.)
dz_y=az_y*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки
в %плоскости ZY, мм
aFI_y=5.00*e(1,12);        % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси X, угл. сек
dFI_y=aFI_y*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси Y радианы
aPI_y=5.0*e(1,13);         % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси Y, угл. сек
dPI_y=aPI_y*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси Y, радианы
aTT_y=5.0*e(1,14);         % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси Z, угл. сек
dTT_y=aTT_y*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси Z, радианы

```

```

TETSxy=-5.0*e(1,15);          % неперпендикулярность в пл. XY в угл. сек
TETRxy=TETSxy*kr;           % неперпендикулярность в пл. XY в радианах
%-----
%
%   Информация о первичных отклонениях для САЛАЗОК
%
%-----

xi=0:-10:-600;              % шаг позиционирования по оси 'x', мм
dx_x=[0.0,0.0,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.002,0.002,0.003,0.003,0.003,0.003,0.003,0.002,0
.002,0.002,0.002,0.003,0.003,0.003,0.004,0.005,0.005,0.005,0.006,0.005,0.005,0.005,0.00
5,0.005,0.005,0.0005,0.004,0.004,0.003,0.003,0.002,-0.002,0.001,0.0,0.0,-0.001,-0.001,-0.001,-
0.001,-0.001,-0.002,-0.001,-0.001,-0.001,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,-0.001,-0.001];
% отклонение позиционирования по X, мм
dx_x(:)=dx_x(:)*e(1,16);    % масштаб отклонений позиционирования вдоль оси X,
jj=0:3:180;                  % шаг задания отклонения от прямолинейности перемещения стойки в
плоскости XYи ZX, град.
ay_x=0.005*e(1,17);         % амплитуда отклонения от прямолинейности
перемещения %салазок в плоскости YX, мм (отклонение в виде полуволны синусоиды,
шаг в град.)
dy_x=ay_x*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки
в %плоскости YX, мм
az_x=0.005*e(1,18);         % амплитуда отклонения от прямолинейности
перемещения %салазок в плоскости ZX, мм (отклонение в виде полуволны синусоиды,
шаг в град.)
dz_x=az_x*sin(jj*pi/180); % отклонения от прямолинейности перемещения стойки
в %плоскости ZX, мм
aFI_x=5.0*e(1,19);          % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси X, угл. сек
dFI_x=aFI_x*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси X, радианы
aPI_x=5.0*e(1,20);          % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси Y угл. сек
dPI_x=aPI_x*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси Y, радианы
aTT_x=5.0*e(1,21);          % амплитуда отклонения угда поворота вокруг оси Z, угл. сек
dTT_x=aTT_x*kr*sin(jj*pi/180);% отклонение угда поворота вокруг оси Z, радианы

%-----
%
%   Информация о первичных отклонениях для КОРПУСА
%   планшайбы
%
%-----

filj=30:-5:-120;           % шаг позиционирования по оси B, град.
dfil_fil=[.0,-1.0,-2.0,-2.0,-2.0,-3.0,-4.0,-5.0,-6.0,-7.0,-8.0,-9.0,-10.0,-11.0,-12.0,-13.0,-15.0,-
16.0,-17.0,-18.0,-19.0,-19.0,-21.0,-22.0,-23.0,-23.0,-24.0,-24.0,-25.0,-25.0,-26.0];%
отклонение %позиционирования по B,угл.сек
dfil_fil(:)=dfil_fil(:)*e(1,22)*kr; % масштаб отклонений позиционирования B, радианы
jj=30:-5:-120;             % шаг задания отклонения аксиального и радиального
биения %корпуса планшайбы, град. (отклонение в виде полуволны синусоиды)
ay_fil=.005*e(1,23);        % амплитуда аксиального биения корпуса планшайбы, мм
dy_fil=ay_fil*sin(jj*pi/180); %аксиальное биение корпуса планшайбы, мм
az_fil=.005*e(1,24);        % амплитуда радиального биения корпуса планшайбы в
направлении оси Z, мм

```

```

dz_fiI=az_fiI*sin(jj*pi/180); %радиальное биение корпуса планшайбы в направлении
оси %Z, мм
ax_fiI=.005*e(1,25);          % амплитуда радиального биения корпуса планшайбы
в %направлении оси X, мм
dx_fiI=ax_fiI*sin(jj*pi/180); %радиальное биение корпуса планшайбы в направлении
оси %X, мм
apsiyox_fiI=5.0*e(1,26);      % амплитуда отклонения (разворота) оси B
(корпуса %планшайбы) в пл. YOX (ECB), угловые секунды
dpsiyox_fiI=apsiyox_fiI*kr*sin(jj*pi/180);%отклонения (разворота) оси B
(корпуса %планшайбы) в пл. YOX (ECB), радианы
apsiyoz_fiI=5.0*e(1,27);      % амплитуда отклонения (разворота) оси B
(корпуса %планшайбы) в пл. YOZ (EAB),угловые секунды
dpsiyoz_fiI=apsiyoz_fiI*kr*sin(jj*pi/180);%отклонения (разворота) оси B
(корпуса %планшайбы) в пл. YOZ (EAB), радианы
TETS1xy=5.0*e(1,28);          % угол между осью B и осью 'y' в пл. XY, в угл. сек
TETR1xy=TETS1xy*kr;          % угол между осью B и осью 'y' в пл. XY в радианах
TETS1yz=5.0*e(1,29);          % угол между осью B и осью 'y' в пл. YZ, в угл. сек
TETR1yz=TETS1yz*kr;          % угол между осью B и осью 'y' в пл. YZ, в радианах
DSbx=0.0*e(1,30);            %совмещение начала координат X0O0Y0 с началом
координат %X5O5Y5 в направлении X, мм
DSbz=0.0*e(1,31);            %совмещение начала координат X0O0Y0 с началом
координат %X5O5Y5 в направлении Z, мм

```

```

%-----
%
% Информация о первичных отклонениях для ПЛАНШАЙБЫ
%
%-----

```

```

fiIj=0:5:360;                % шаг позиционирования по оси 'C', град.
dfiI_fiI=[.0,.1,.0,.1,.1,.1,.0,.0,.0,.0,.1,.2,.2,.3,.4,.5,.6,.6,.6,.5,.6,.6,.5,.5,.4,.2,.2,.2,.1,.0,-.1,-.2,-
.1,-.2,-.3,-.4,-.4,-.4,-.3,-.3,-.1,.1,.2,.4,.6,.6,.8,.9,.1.0,1.1,1.2,1.3,1.3,1.4,1.4,1.4,1.3,1.3,1.3,
1.1,1.0,1.0,.8,.5,.4,.4,.3,.3,.2,.2,-.2] % отклонение позиционирования по C,угл. сек.
dfiI_fiI(:)=dfiI_fiI(:)*e(1,32)*kr; % масштаб отклонений позиционирования C, радианы
jj=0:5:360;                  % шаг задания отклонения аксиального и радиального бие-
ния %планшайбы, град. (отклонение в виде полуволны синусоиды)
az_fiI=.005*e(1,33);          % амплитуда аксиального биения планшайбы, мм
dz_fiI=az_fiI*sin(jj*pi/180); %аксиальное биение планшайбы, мм
ax_fiI=.005*e(1,34);          % амплитуда радиального биения планшайбы в направ-
% лении оси X, мм
dx_fiI=ax_fiI*sin(jj*pi/180); %радиальное биение планшайбы в направлении оси X, мм
ay_fiI=.005*e(1,35);          % амплитуда радиального биения планшайбы в направ-
% лении оси Y, мм
dy_fiI=ay_fiI*sin(jj*pi/180); % радиальное биение планшайбы в направлении оси Y, мм
apsixoz_fiI=5.0*e(1,36);      % амплитуда отклонения (разворота) оси C (планшай-
бы) в пл. XOZ (EBC), угловые секунды
dpsixoz_fiI=apsixoz_fiI*kr*sin(jj*pi/180);%отклонения (разворота) оси C (планшайбы)
в %пл. XOZ (EBC), радианы
apsiyoz_fiI=5.0*e(1,37);      % амплитуда отклонения (разворота) оси C (планшай-
%бы) в пл. YOZ (EAC), угловые секунды
dpsiyoz_fiI=apsiyoz_fiI*kr*sin(jj*pi/180);%отклонения (разворота) оси C (планшайбы)
в %пл. YOZ (EAC), радианы

```

```

TETS2xy=5.0*e(1,38);           % угол между осью O5Y5и осью O4Y4 в пл. XY, в
угл. %сек
TETR2xy=TETS2xy*kr;           % угол между осью O5Y5и осью O4Y4 в пл. XY, в ради-
%анах
TETS2yz=5.0*e(1,39);           % угол между осью O5Y5и осью O4Y4 в пл. YZ, в
угл. %сек
TETR2yz=TETS2yz*kr;           % угол между осью O5Y5и осью O4Y4 в пл. YZ, в радианах
dxCB=0.0*e(1,40);             %отклонение (смещение) оси С от номинальной точ-
ки %пересечения осей С и В в пл XY (зеркало планшайбы), мкм

dzCB=0.0*e(1,41);             %отклонение (смещение) оси С от номинальной
точки %пересечения осей С и В в пл. ZY, мкм
end

```

```

%-----
%
%  Информация о векторах перехода из одной подсистемы
%      несущей системы станка в другую
%
%-----

```

```

x1=-0; y1=-100; z1=-500; O0O1=[x1
    y1
    z1
    1];% вектор, соединяющий начало координат X0Y0Z0 с началом
% координат X1Y1Z1
x2=-300; y2=-100; z2=-300;
    O1O2=[x2
    y2
    z2
    1]; % вектор, соединяющий начало координат X1Y1Z1 с
началом %координат X2Y2Z2
x3=-0; y3=-100; z3=-400;
    O2O3=[x3
    y3
    z3
    1];% вектор, соединяющий начало координат X2Y2Z2 с началом
%координат X3Y3Z3
x4=0; y4=-0; z4=-0;
    O0O4=[x4
    y4
    z4
    1];% вектор, соединяющий начало координат X0Y0Z0 с началом
%координат X4Y4Z4
x5=0; y5=-0; z5=-0;
    O4O5=[x5
    y5
    z5
    1];% вектор, соединяющий начало координат X4Y4Z4 с началом
%координат X5Y5Z5
x6=0; y6=0; z6=-100;

```

```

O3Pf3=[x6
      y6
      z6
      1];% вектор, соединяющий начало координат
X3'Y3'Z3'(идеальной)с %точкой P, находящейся на режущем инструменте
x7=0; y7=120; z7=50;
O5Pp3=[x7
      y7
      z7
      1];% вектор, соединяющий начало координат
X5'Y5'Z5'(идеальной)с % точкой, находящейся на обрабатываемой
детали.
%=====
%
%      Вычисление интегрального
%      отклонения для pi - точки (xi,
%      yi, zi)
%=====
for i=1:60
    k, i,
    ddx_x(i)=interp1(xi,dx_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении позиционирования по X
    ddy_x(i)=interp1(xi,dy_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении прямолинейности при движении по X в пл. XY
    ddz_x(i)=interp1(xi,dz_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении прямолинейности при движении по Y в пл. ZX
    ddFI_x(i)=interp1(xi,dFI_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении поворота вокруг оси 'x' при движении по 'x'
    ddPI_x(i)=interp1(xi,dPI_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении поворота вокруг оси Y при движении по X
    ddTT_x(i)=interp1(xi,dTT_x,xk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении поворота вокруг оси Z при движении по X
    ddx_y(i)=interp1(yi,dx_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении прямолинейности при движении по Y в пл. XY
    ddy_y(i)=interp1(yi,dy_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении позиционирования по Y
    ddz_y(i)=interp1(yi,dz_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении прямолинейности при движении по Y в пл. ZY
    ddFI_y(i)=interp1(yi,dFI_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении поворота вокруг оси X при движении по Y
    ddPI_y(i)=interp1(yi,dPI_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении поворота вокруг оси Y при движении по Y
    ddTT_y(i)=interp1(yi,dTT_y,yk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении поворота вокруг оси Z при движении по Y
    ddx_z(i)=interp1(zi,dx_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении прямолинейности при движении по Z в пл. ZX
    ddy_z(i)=interp1(zi,dy_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении прямолинейности при движении по Y в пл. ZY
    ddz_z(i)=interp1(zi,dz_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении позиционирования по Z
    ddFI_z(i)=interp1(zi,dFI_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
    в %отклонении поворота вокруг оси X при движении по Z

```

```

ddPI_z(i)=interp1(zi,dPI_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
в %отклонении поворота вокруг оси Y при движении по Z
ddTT_z(i)=interp1(zi,dTT_z,zk(i),'linear');%линейная интерполяция промежуточной точки
в %отклонении поворота вокруг оси Z при движении по Z
a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x1+ddx_x(i)+yk(i)*sin(TETRxy);
a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y1+ddy_x(i)-yk(i)*(1-cos(TETRxy));
a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z1+ddz_x(i);
a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14
      a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
      a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
      a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(ddFI_x(i)); a2a23=-sin(ddFI_x(i)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(ddFI_x(i)); a2a33=cos(ddFI_x(i)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
      a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
      a2a31, a2a32, a2a33, a2a34
      a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(ddPI_x(i)); a3a12=0; a3a13=sin(ddPI_x(i)); a3a14=0;
a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(ddPI_x(i)); a3a32=0; a3a33=cos(ddPI_x(i)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
      a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
      a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
      a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(ddTT_x(i)); a4a12=-sin(ddTT_x(i)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(ddTT_x(i)); a4a22=cos(ddTT_x(i)); a4a23=0; a4a24=0;
a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
      a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
      a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
      a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
A01 = A1A*A2A*A3A*A4A;          % матрица A01
a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x2+ddx_y(i);
a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y2+ddy_y(i);
a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z2+ddz_y(i);
a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14
      a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
      a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
      a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(ddFI_y(i)); a2a23=-sin(ddFI_y(i)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(ddFI_y(i)); a2a33=cos(ddFI_y(i)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
      a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
      a2a31, a2a32, a2a33, a2a34

```



```

a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(ddPI_y(i)); a3a12=0; a3a13=sin(ddPI_y(i)); a3a14=0;
a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(ddPI_y(i)); a3a32=0; a3a33=cos(ddPI_y(i)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
      a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
      a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
      a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(ddTT_y(i)); a4a12=-sin(ddTT_y(i)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(ddTT_y(i)); a4a22=cos(ddTT_y(i)); a4a23=0; a4a24=0;
a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
      a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
      a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
      a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
a5a11=cos(TETRxy); a5a12=-sin(TETRxy); a5a13=0; a5a14=0;
a5a21=sin(TETRxy); a5a22=cos(TETRxy); a5a23=0; a5a24=0;
a5a31=0; a5a32=0; a5a33=1; a5a34=0;
a5a41=0; a5a42=0; a5a43=0; a5a44=1;
A5A=[a5a11, a5a12, a5a13, a5a14
      a5a21, a5a22, a5a23, a5a24
      a5a31, a5a32, a5a33, a5a34
      a5a41, a5a42, a5a43, a5a44];
A12 = A1A*A2A*A3A*A4A*A5A;           % матрица A12
a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x3+ddx_z(i);
a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y3+ddy_z(i);
a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z3+ddz_z(i);
a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14
      a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
      a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
      a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(ddFI_z(i)); a2a23=-sin(ddFI_z(i)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(ddFI_z(i)); a2a33=cos(ddFI_z(i)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
      a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
      a2a31, a2a32, a2a33, a2a34
      a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(ddPI_z(i)); a3a12=0; a3a13=sin(ddPI_z(i)); a3a14=0;
a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(ddPI_z(i)); a3a32=0; a3a33=cos(ddPI_z(i)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
      a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
      a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
      a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(ddTT_z(i)); a4a12=-sin(ddTT_z(i)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(ddTT_z(i)); a4a22=cos(ddTT_z(i)); a4a23=0; a4a24=0;

```

```

a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
      a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
      a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
      a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
a5a11=cos(TETRxz); a5a12=0; a5a13=sin(TETRxz); a5a14=0;
a5a21=0; a5a22=1; a5a23=0; a5a24=0;
a5a31=-sin(TETRxz); a5a32=0; a5a33=cos(TETRxz); a5a34=0;
a5a41=0; a5a42=0; a5a43=0; a5a44=1;
A5A=[a5a11, a5a12, a5a13, a5a14
      a5a21, a5a22, a5a23, a5a24
      a5a31, a5a32, a5a33, a5a34
      a5a41, a5a42, a5a43, a5a44];
a6a11=1; a6a12=0; a6a13=0; a6a14=0;
a6a21=0; a6a22=cos(TETRyz); a6a23=-sin(TETRyz); a6a24=0;
a6a31=0; a6a32=sin(TETRyz); a6a33=cos(TETRyz); a6a34=0;
a6a41=0; a6a42=0; a6a43=0; a6a44=1;
A6A=[a6a11, a6a12, a6a13, a6a14
      a6a21, a6a22, a6a23, a6a24
      a6a31, a6a32, a6a33, a6a34
      a6a41, a6a42, a6a43, a6a44];
A23 = A1A*A2A*A3A*A4A*A5A*A6A;

```

```

    fifi=1; %fifi=0 Выключение моделирования по угловым координатам, fifi=1 - включение
        if fifi ==1
            j=i;
            ddfil_fil(j)= interp1(filj,dfil_fil,fil(j),'linear');%линейная интерполяция
            промежуточной %точки в отклонении позиционирования по 'fil'
            ddy_fil(j)= interp1(filj,dy_fil,fil(j),'linear'); %аксиальное биение корпуса планшайбы, мкм
            ddz_fil(j)= interp1(filj,dz_fil,fil(j),'linear'); %радиальное биение корпуса ппншайбы
            в %направлении оси Z, мкм
            ddx_fil(j)= interp1(filj,dx_fil,fil(j),'linear'); %радиальное биение корпуса ппншайбы
            в %направлении оси X, мкм
            ddpsiyox_fil(j)=interp1(filj,dpsiyox_fil,fil(j),'linear');%отклонения (разворота) оси В
            (корпуса %планшайбы) в пл. YOХ (ECВ), угловые секунды
            ddpsiyoz_fil(j)=interp1(filj,dpsiyoz_fil,fil(j),'linear');%отклонения (разворота) оси В
            (корпуса %планшайбы) в пл. YOZ (EAB), угловые секунды
            ddfiI_fiI(j)= interp1(fiIj,dfiI_fiI,fiI(j),'linear');%линейная интерполяция
            промежуточной %точки в отклонении позиционирования по fiI
            ddy_fiI(j)= interp1(fiIj,dy_fiI,fiI(j),'linear'); %аксиальное биение планшайбы, мкм
            ddz_fiI(j)= interp1(fiIj,dz_fiI,fiI(j),'linear'); %радиальное биение ппншайбы
            в %направлении оси X, мкм
            ddx_fiI(j)= interp1(fiIj,dx_fiI,fiI(j),'linear'); %радиальное биение ппншайбы
            в %направлении оси Y, мкм
            ddpsiyoz_fiI(j)=interp1(fiIj,dpsiyoz_fiI,fiI(j),'linear');%отклонения (разворота) оси
            С %(планшайбы) в пл. YOZ (EAC), угловые секунды
            ddpsioxoz_fiI(j)=interp1(fiIj,dpsioxoz_fiI,fiI(j),'linear');%отклонения (разворота) оси
            С %(планшайбы) в пл. XOZ (EBC), угловые секунды
            a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x4+ddx_fil(j);
            a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y4+ddy_fil(j);
            a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z4+ddz_fil(j);

```

```

a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14
      a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
      a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
      a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(ddpsiyoz_fil(j)); a2a23=-sin(ddpsiyoz_fil(j)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(ddpsiyoz_fil(j)); a2a33=cos(ddpsiyoz_fil(j)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
      a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
      a2a31, a2a32, a2a33, a2a34
      a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(ddfil_fil(j)); a3a12=0; a3a13=sin(ddfil_fil(j)); a3a14=0;
a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(ddfil_fil(j)); a3a32=0; a3a33=cos(ddfil_fil(j)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
      a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
      a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
      a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(ddpsiyox_fil(j)); a4a12=-sin(ddpsiyox_fil(j)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(ddpsiyox_fil(j)); a4a22=cos(ddpsiyox_fil(j)); a4a23=0; a4a24=0;
a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
      a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
      a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
      a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
a5a11=1; a5a12=0; a5a13=0; a5a14=0;
a5a21=0; a5a22=cos(TETR1yz); a5a23=-sin(TETR1yz); a5a24=0;
a5a31=0; a5a32=sin(TETR1yz); a5a33=cos(TETR1yz); a5a34=0;
a5a41=0; a5a42=0; a5a43=0; a5a44=1;
A5A=[a5a11, a5a12, a5a13, a5a14
      a5a21, a5a22, a5a23, a5a24
      a5a31, a5a32, a5a33, a5a34
      a5a41, a5a42, a5a43, a5a44];
a6a11=cos(TETR1xy); a6a12=-sin(TETR1xy); a6a13=0; a6a14=0;
a6a21=sin(TETR1xy); a6a22=cos(TETR1xy); a6a23=0; a6a24=0;
a6a31=0; a6a32=0; a6a33=1; a6a34=0;
a6a41=0; a6a42=0; a6a43=0; a6a44=1;
A6A=[a6a11, a6a12, a6a13, a6a14
      a6a21, a6a22, a6a23, a6a24
      a6a31, a6a32, a6a33, a6a34
      a6a41, a6a42, a6a43, a6a44];
% A1A,A2A,A3A,A4A,A5A,A6A,
A04 = A1A*A2A*A3A*A4A*A5A*A6A;
a1a11=1; a1a12=0; a1a13=0; a1a14=x5+ddx_filII(j)+dxCB;
a1a21=0; a1a22=1; a1a23=0; a1a24=y5+ddy_filII(j);
a1a31=0; a1a32=0; a1a33=1; a1a34=z5+ddz_filII(j)+dzCB;
a1a41=0; a1a42=0; a1a43=0; a1a44=1;
A1A=[a1a11, a1a12, a1a13, a1a14

```

```

a1a21, a1a22, a1a23, a1a24
a1a31, a1a32, a1a33, a1a34
a1a41, a1a42, a1a43, a1a44];
a2a11=1; a2a12=0; a2a13=0; a2a14=0;
a2a21=0; a2a22=cos(ddpsiyoz_fiII(j)); a2a23=-sin(ddpsiyoz_fiII(j)); a2a24=0;
a2a31=0; a2a32=sin(ddpsiyoz_fiII(j)); a2a33=cos(ddpsiyoz_fiII(j)); a2a34=0;
a2a41=0; a2a42=0; a2a43=0; a2a44=1;
A2A=[a2a11, a2a12, a2a13, a2a14
a2a21, a2a22, a2a23, a2a24
a2a31, a2a32, a2a33, a2a34
a2a41, a2a42, a2a43, a2a44];
a3a11=cos(ddpsixoz_fiII(j)); a3a12=0; a3a13=sin(ddpsixoz_fiII(j)); a3a14=0;
a3a21=0; a3a22=1; a3a23=0; a3a24=0;
a3a31=-sin(ddpsixoz_fiII(j)); a3a32=0; a3a33=cos(ddpsixoz_fiII(j)); a3a34=0;
a3a41=0; a3a42=0; a3a43=0; a3a44=1;
A3A=[a3a11, a3a12, a3a13, a3a14
a3a21, a3a22, a3a23, a3a24
a3a31, a3a32, a3a33, a3a34
a3a41, a3a42, a3a43, a3a44];
a4a11=cos(ddfiII_fiII(j)); a4a12=-sin(ddfiII_fiII(j)); a4a13=0; a4a14=0;
a4a21=sin(ddfiII_fiII(j)); a4a22=cos(ddfiII_fiII(j)); a4a23=0; a4a24=0;
a4a31=0; a4a32=0; a4a33=1; a4a34=0;
a4a41=0; a4a42=0; a4a43=0; a4a44=1;
A4A=[a4a11, a4a12, a4a13, a4a14
a4a21, a4a22, a4a23, a4a24
a4a31, a4a32, a4a33, a4a34
a4a41, a4a42, a4a43, a4a44];
a5a11=1; a5a12=0; a5a13=0; a5a14=0;
a5a21=0; a5a22=cos(TETR2yz); a5a23=-sin(TETR2yz); a5a24=0;
a5a31=0; a5a32=sin(TETR2yz); a5a33=cos(TETR2yz); a5a34=0;
a5a41=0; a5a42=0; a5a43=0; a5a44=1;
A5A=[a5a11, a5a12, a5a13, a5a14
a5a21, a5a22, a5a23, a5a24
a5a31, a5a32, a5a33, a5a34
a5a41, a5a42, a5a43, a5a44];
a6a11=cos(TETR2xy); a6a12=-sin(TETR2xy); a6a13=0; a6a14=0;
a6a21=sin(TETR2xy); a6a22=cos(TETR2xy); a6a23=0; a6a24=0;
a6a31=0; a6a32=0; a6a33=1; a6a34=0;
a6a41=0; a6a42=0; a6a43=0; a6a44=1;
A6A=[a6a11, a6a12, a6a13, a6a14
a6a21, a6a22, a6a23, a6a24
a6a31, a6a32, a6a33, a6a34
a6a41, a6a42, a6a43, a6a44];
%
A45 = A1A*A2A*A3A*A4A*A5A*A6A;
end
A03=A01*A12*A23; % матрица для идеального станка X, Y, Z
if fifi==1
A05=A04*A45; % матрица для идеального станка FI1, FI2
end
if k==2 %действительный станок
AA03=A03; % матрица для действительного станка X, Y, Z

```

```

if fifi==1
    A05=A04*A45;
    AA05=A05;          % матрица для действительного станка F11, F12
end
PAD=AA03*O3Pf3;
PADI(i,1)=i;
PADI(i,2)=PAD(1);
PADI(i,3)=PAD(2);
PADI(i,4)=PAD(3);
PADI(i,5)=PAD(4);
PBD= AA05*O5Pp3;    % отклонение точки P обрабатываемой детали
PBDI(i,1)=i;
PBDI(i,2)=PBD(1);
PBDI(i,3)=PBD(2);
PBDI(i,4)=PBD(3);
PBDI(i,5)=PBD(4);
end                %конец цикла для действительного станка
if k==1
PAZ=A03*O3Pf3;
PAZI(i,1)=i;
PAZI(i,2)=PAZ(1);
PAZI(i,3)=PAZ(2);
PAZI(i,4)=PAZ(3);
PAZI(i,5)=PAZ(4);
PBZ=A05*O5Pp3;
PBZI(i,1)=i;
PBZI(i,2)=PBZ(1);
PBZI(i,3)=PBZ(2);
PBZI(i,4)=PBZ(3);
PBZI(i,5)=PBZ(4);
end
                end % конец цикла по i
                end %конец цикла по k
PBD,PBZ,
A05,O5Pp3,
%PAZI,PADI,
DPA(:,1)=PAZI(:,1); % номер точки
DPB(:,1)=PBZI(:,1); % номер точки
DPA(:,2)=PADI(:,2)-PAZI(:,2); % отклонение по коорд. X для точки на фрезе
DPA(:,3)=PADI(:,3)-PAZI(:,3); % отклонение по коорд. Y для точки на фрезе
DPA(:,4)=PADI(:,4)-PAZI(:,4); % отклонение по коорд. Z для точки на фрезе
DPB(:,2)=PBDI(:,2)-PBZI(:,2); % отклонение по коорд. X для точки на обрабатываемой
детали
DPB(:,3)=PBDI(:,3)-PBZI(:,3); % отклонение по коорд. Y для точки на обрабатываемой
детали
DPB(:,4)=PBDI(:,4)-PBZI(:,4); % отклонение по коорд. Z для точки на обрабатываемой
детали
mra=0;mrbi=0;
mrai=0;mrbi=0;
for i=1:60
DPA(i,5)=sqrt(DPA(i,2)^2+DPA(i,3)^2+DPA(i,4)^2);
DPB(i,5)=sqrt(DPB(i,2)^2+DPB(i,3)^2+DPB(i,4)^2);

```

```
if DPA(i,5)>mra
    mra=DPA(i,5); mrai=i;
end
if DPB(i,5)>mrB
    mrB=DPB(i,5); mrbi=i;
end
end
u=DPA(:,2)+DPB(:,2),
v=DPA(:,3)+DPB(:,3),
w=DPA(:,4)+DPB(:,4),
for i=1:60
    mr(i)=sqrt(u(i)^2+v(i)^2+w(i)^2);
end
maxr=max(mr);
minr=min(mr);
mra, mrai,
mrB, mrbi,
minr,
dd=maxr-minr,
hold on
pause
quiver3(xk,yk,zk,u,v,w)
hold off
```

ПРИЛОЖЕНИЕ № 4

Координаты контрольных точек для анализа объёмной точности

xk =

1.0e+02 *

-3.2500000000000000	-3.0000000000000000	-2.7500000000000000	-2.566987298107780	-2.5000000000000000
-3.769615242270663	-3.6000000000000000	-3.269615242270663	-2.866987298107781	-2.5000000000000000
-4.1500000000000000	-4.039230484541326	-3.6500000000000000	-3.086602540378444	-2.5000000000000000
-4.289230484541326	-4.2000000000000000	-3.789230484541326	-3.166987298107781	-2.5000000000000000
-4.1500000000000000	-4.039230484541326	-3.6500000000000000	-3.086602540378444	-2.5000000000000000
-3.769615242270663	-3.6000000000000000	-3.269615242270663	-2.866987298107781	-2.5000000000000000
-3.2500000000000000	-3.0000000000000000	-2.7500000000000000	-2.566987298107781	-2.5000000000000000
-2.730384757729337	-2.4000000000000000	-2.230384757729337	-2.266987298107781	-2.5000000000000000
-2.3500000000000000	-1.960769515458674	-1.8500000000000000	-2.047372055837118	-2.5000000000000000
-2.210769515458674	-1.8000000000000000	-1.710769515458674	-1.966987298107781	-2.5000000000000000
-2.3500000000000000	-1.960769515458674	-1.8500000000000000	-2.047372055837117	-2.5000000000000000
-2.730384757729336	-2.3999999999999999	-2.230384757729336	-2.266987298107781	-2.5000000000000000

yk =

1.0e+02 *

-2.7000000000000000	-2.7000000000000000	-2.7000000000000000	-2.7000000000000000	-2.7000000000000000
-2.539230484541326	-2.539230484541326	-2.539230484541326	-2.539230484541326	-2.539230484541326
-2.1000000000000000	-2.1000000000000000	-2.1000000000000000	-2.1000000000000000	-2.1000000000000000
-1.5000000000000000	-1.5000000000000000	-1.5000000000000000	-1.5000000000000000	-1.5000000000000000
-0.9000000000000000	-0.9000000000000000	-0.9000000000000000	-0.9000000000000000	-0.9000000000000000
-0.460769515458674	-0.460769515458674	-0.460769515458674	-0.460769515458674	-0.460769515458674
-0.3000000000000000	-0.3000000000000000	-0.3000000000000000	-0.3000000000000000	-0.3000000000000000
-0.460769515458674	-0.460769515458674	-0.460769515458674	-0.460769515458674	-0.460769515458674
-0.8999999999999999	-0.8999999999999999	-0.8999999999999999	-0.8999999999999999	-0.8999999999999999
-1.5000000000000000	-1.5000000000000000	-1.5000000000000000	-1.5000000000000000	-1.5000000000000000
-2.1000000000000000	-2.1000000000000000	-2.1000000000000000	-2.1000000000000000	-2.1000000000000000
-2.539230484541326	-2.539230484541326	-2.539230484541326	-2.539230484541326	-2.539230484541326

zk =

1.0e+02 *

-0.866987298107781	-0.8000000000000000	-0.866987298107781	-1.0500000000000000	-1.3000000000000000
-1.166987298107781	-0.8000000000000000	-0.566987298107781	-0.530384757729337	-0.7000000000000000
-1.386602540378444	-0.8000000000000000	-0.347372055837118	-0.1500000000000000	-0.260769515458674
-1.466987298107781	-0.8000000000000000	-0.266987298107781	-0.010769515458674	-0.1000000000000000
-1.386602540378444	-0.8000000000000000	-0.347372055837117	-0.1500000000000000	-0.260769515458674
-1.166987298107781	-0.8000000000000000	-0.566987298107781	-0.530384757729337	-0.7000000000000000
-0.866987298107781	-0.8000000000000000	-0.866987298107781	-1.0500000000000000	-1.3000000000000000
-0.566987298107781	-0.8000000000000000	-1.166987298107781	-1.569615242270663	-1.9000000000000000
-0.347372055837118	-0.8000000000000000	-1.386602540378444	-1.9500000000000000	-2.339230484541326
-0.266987298107781	-0.8000000000000000	-1.466987298107781	-2.089230484541327	-2.5000000000000000
-0.347372055837118	-0.8000000000000000	-1.386602540378444	-1.9500000000000000	-2.339230484541326
-0.566987298107780	-0.8000000000000000	-1.166987298107781	-1.569615242270664	-1.9000000000000001

B (vpci = 30:-30:-90),

C (vfi = 0:30:330)

ПРИЛОЖЕНИЕ № 5

Первичные отклонения

Салазки

1) **E_{XX}** - отклонения позиционирования в функции координаты x при движении каретки вдоль оси X_0 .

$x_i=0:-10:-600$ координаты позиционирования по оси X , мм.

dx_x отклонение позиционирования по X , мм (рис. 8.1).

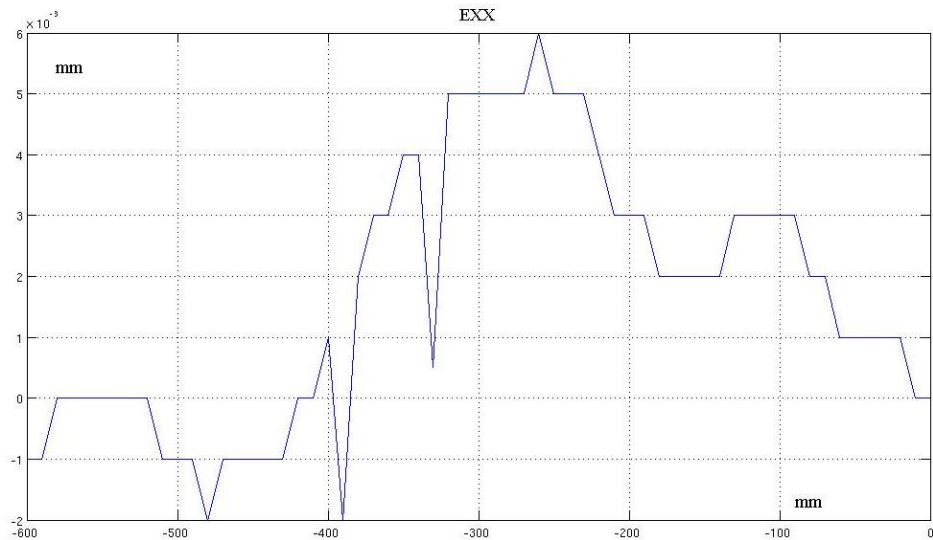


Рис. 8.1

2) **E_{YX}** – отклонения от прямолинейности в плоскости $X_0O_0Y_0$.

dy_x отклонения от прямолинейности перемещения салазок в плоскости YX , мм (рис. 8.2)

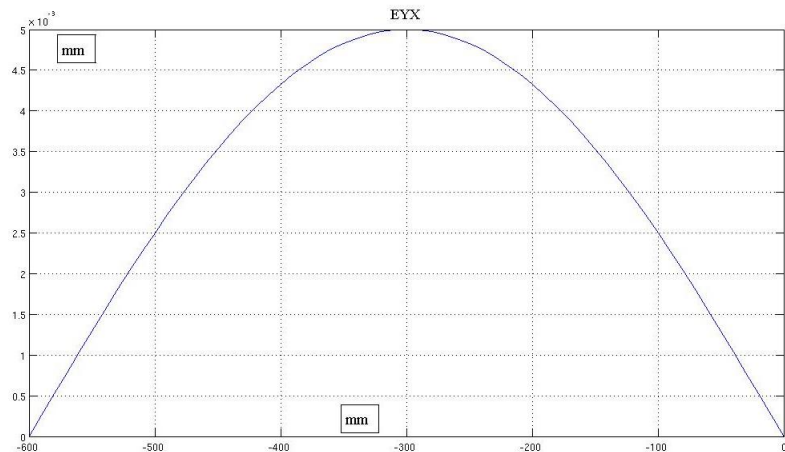


Рис. 8.2

3) EZX - отклонения от прямолинейности в плоскости $X_0O_0Z_0$.

dz_x - отклонения от прямолинейности перемещения салазок в плоскости ZX , мм (рис.8.3).

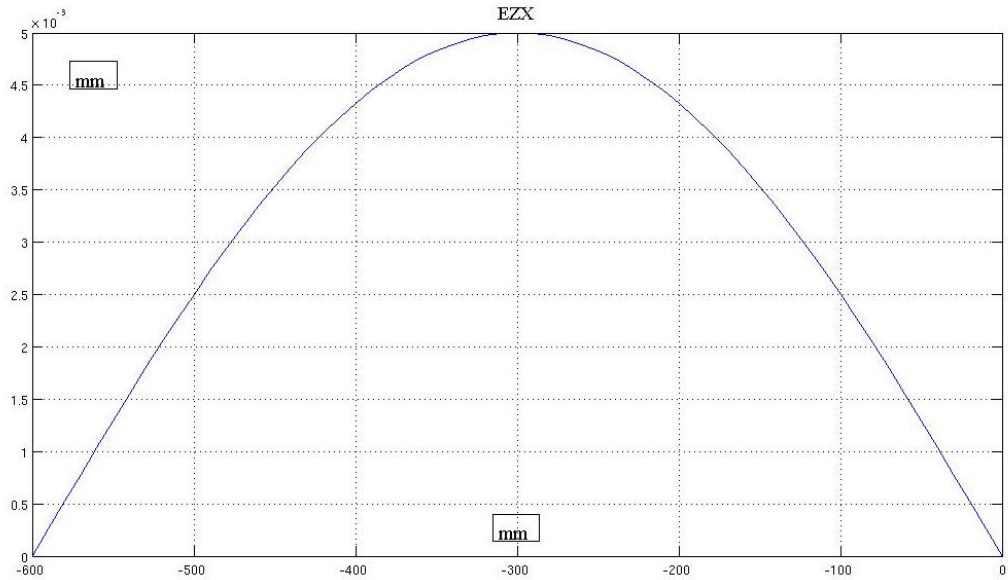


Рис. 8.3

4) EAX – поворот вокруг оси X_0 при движении салазок вдоль оси X_0 .

dFI_x - отклонение угла поворота вокруг оси X , радианы (рис. 8.4).

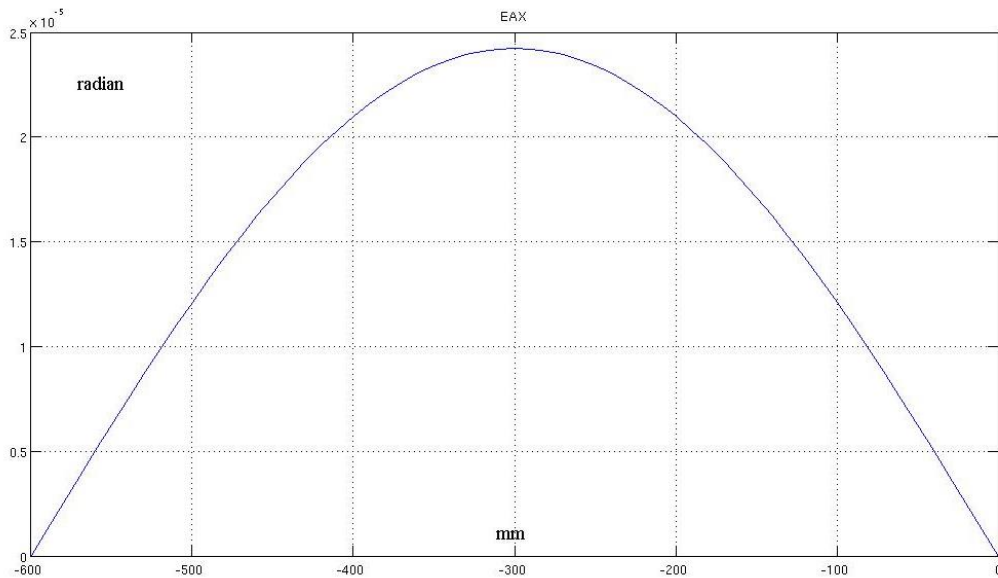


Рис. 8.4 (5")

5) EBX – поворот вокруг оси Y_0 при движении салазок вдоль оси

X_0 .

dPI_x - отклонение угла поворота вокруг оси Y , радианы (рис. 8.5)

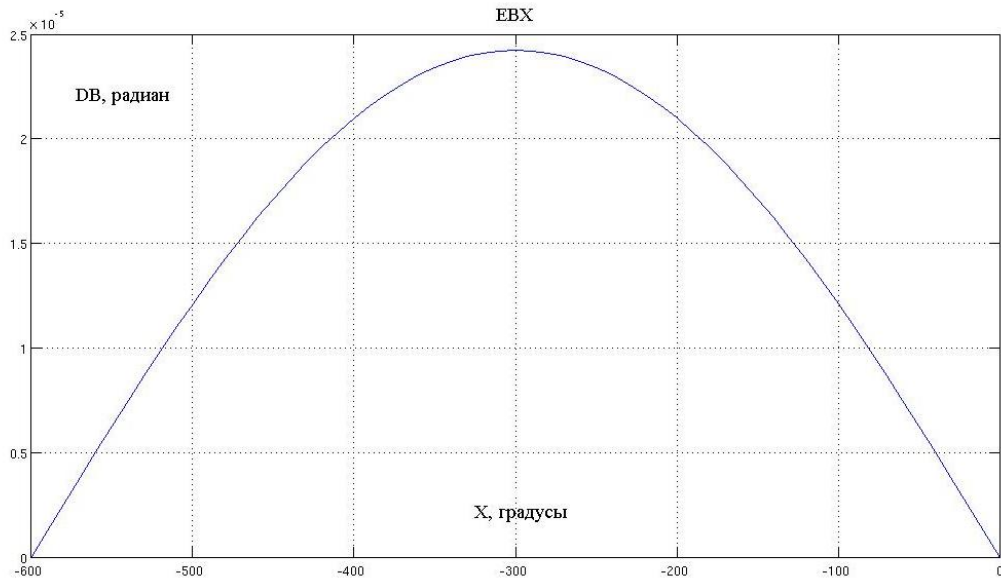


Рис.8.5 (5")

6) ECX - поворот вокруг оси Z_0 при движении салазок вдоль оси X_0 .

dTT_x - отклонение угла поворота вокруг оси Z , радианы (рис.8.6)

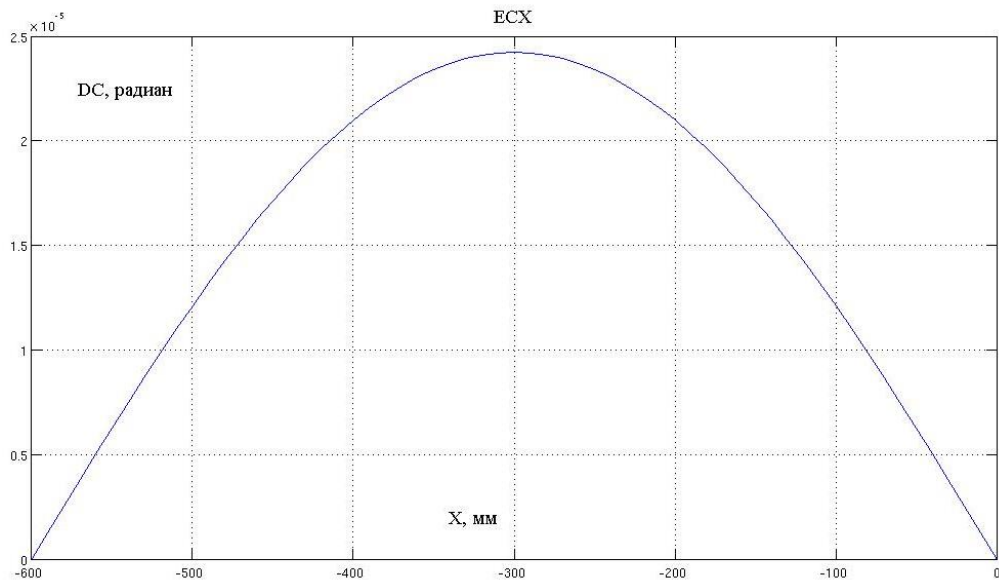


Рис. 8.6 (5")

Стойка

7) E_{YY} - отклонения позиционирования стойки в функции координаты y_1 при её движении вдоль оси Y_1 .

$y_i=0:-10:-320$ координаты позиционирования по оси Y , мм.

dy_y - отклонение позиционирования по Y , мм (рис. 8.7).

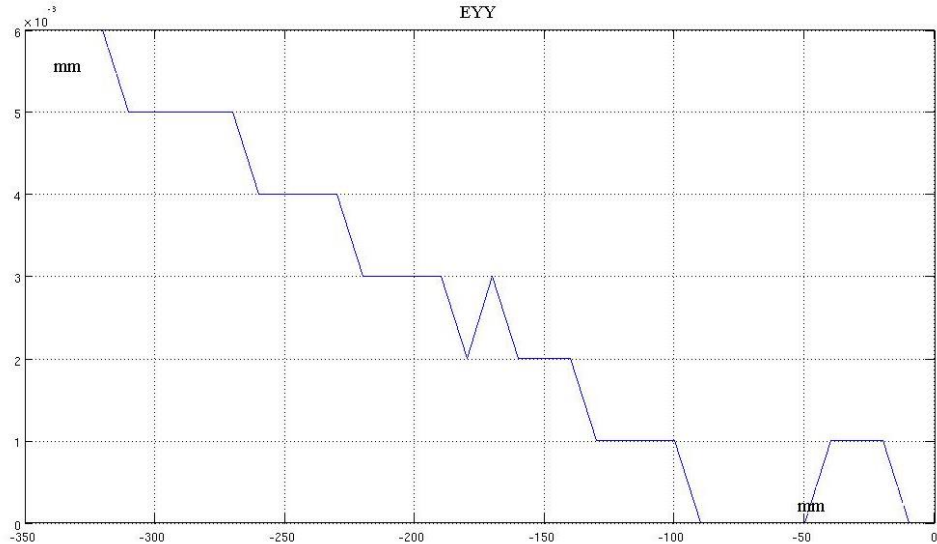


Рис. 8.7 (6мкм)

8) E_{XY} – отклонения от прямолинейности стойки в пл. $X_1O_1Y_1$ при её движении вдоль оси Y_1 .

dx_y - отклонения от прямолинейности перемещения стойки в плоскости XY , мм (рис. 8.8).

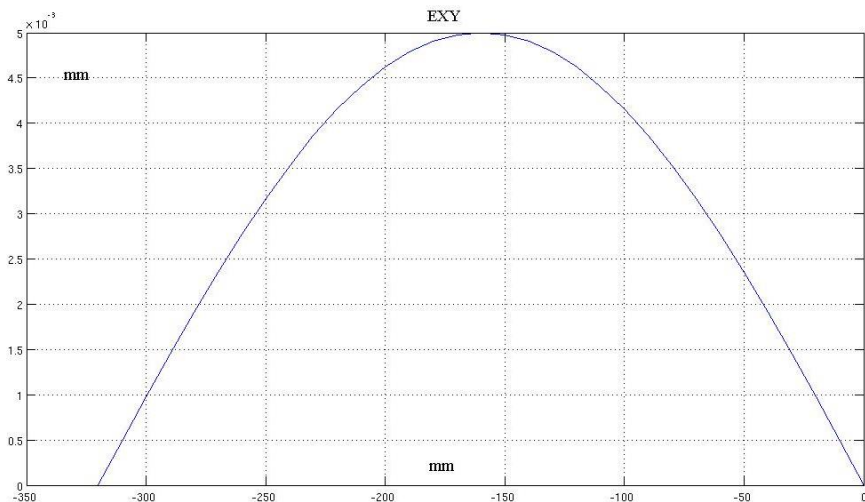


Рис. 8.8 (5мкм)

9) EZY отклонения от прямолинейности стойки в пл. $Y_1O_1Z_1$ при её движении вдоль оси Y_1 .

dz_y - отклонения от прямолинейности перемещения стойки в плоскости ZY, мм (рис. 8.9).

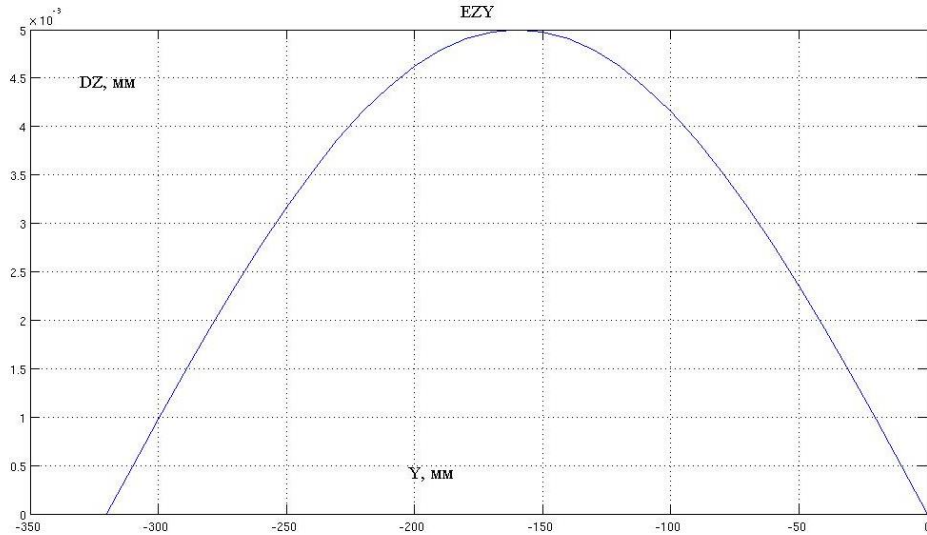


Рис. 8.9 (5мкм)

10) EAY поворот вокруг оси X_1 при движении стойки.

dFI_y - отклонение угла поворота вокруг оси X, радианы (рис. 8.10).

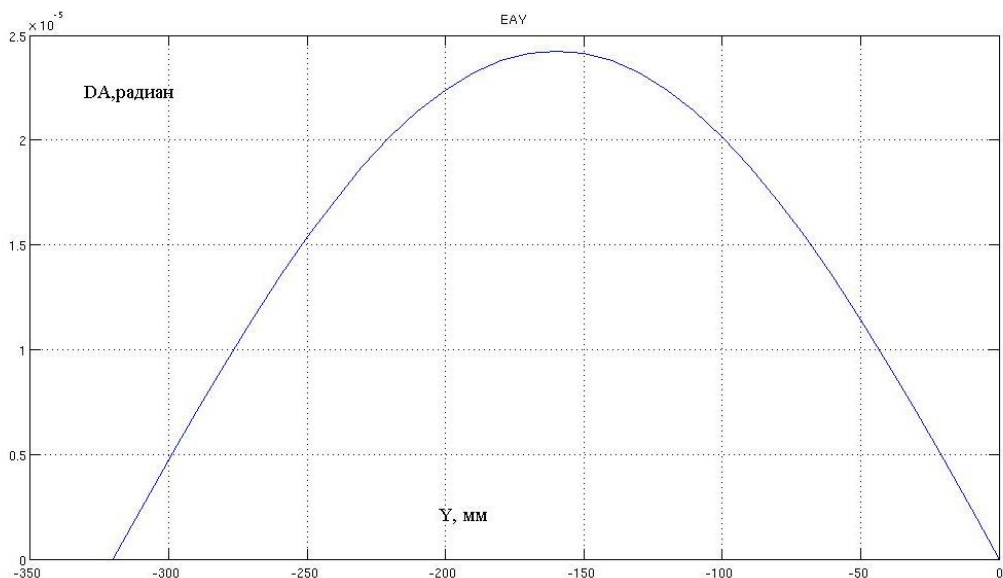


Рис. 8.10 (5")

11) ЕВУ поворот вокруг оси Y_1 при движении стойки вдоль оси Y_1 .

dPI_y - отклонение угла поворота вокруг оси Y_1 , радианы (рис. 8.11).

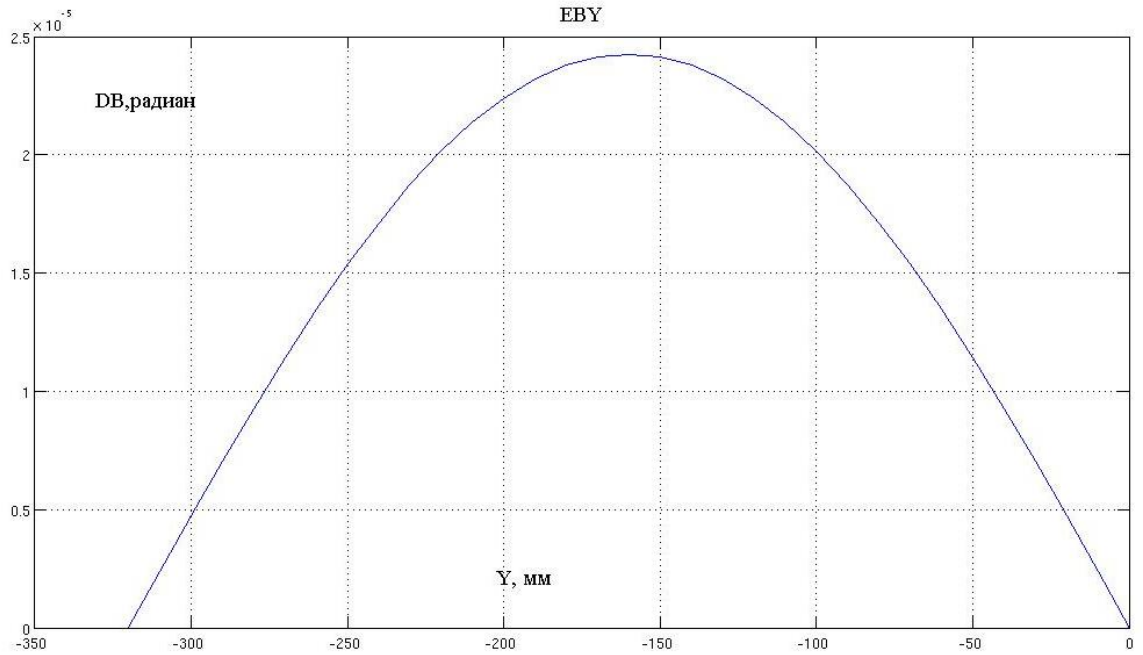


Рис. 8.11 (5")

12) ЕСУ поворот вокруг оси Z_1 при движении стойки (ЕСУ).

dTT_y - отклонение угла поворота вокруг оси Z_1 , радианы (рис. 8.12).

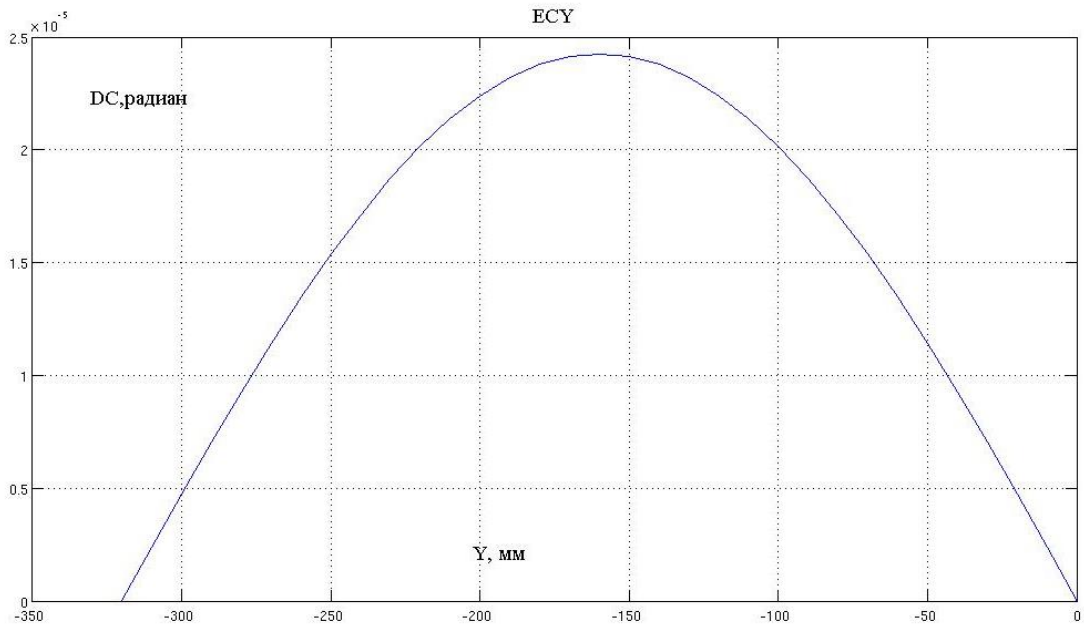


Рис. 8.12 (5")

Шпиндельная бабка

13) EZZ отклонения позиционирования шпиндельной бабки в функции координаты z_2 при её движении вдоль оси Z_2 .

zi=0:-10:-310 координаты позиционирования по оси Z , мм.

dz_z - отклонение позиционирования по Z , мм (рис. 8.13).

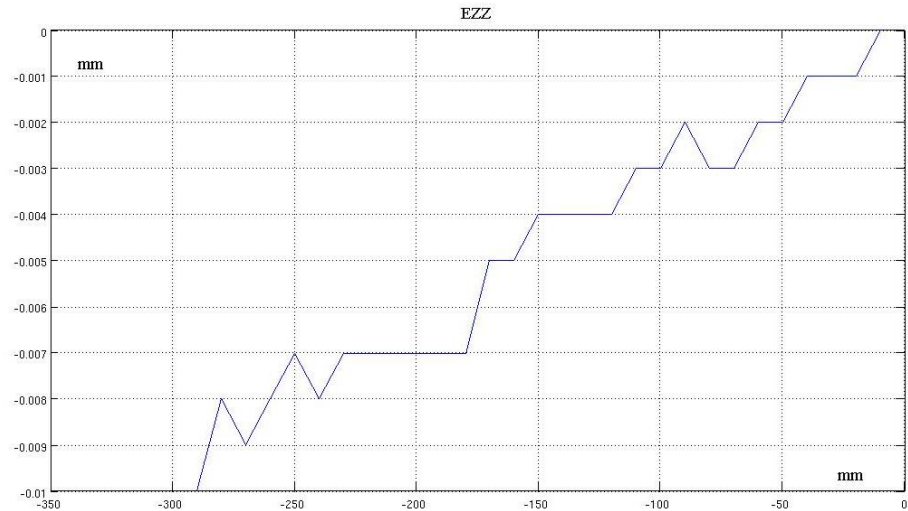


Рис. 8.13 (10 мкм)

14) EXZ отклонения от прямолинейности движения шпиндельной бабки в пл. $X_2O_2Z_2$.

dx_z - отклонения от прямолинейности перемещения шпиндельной бабки в плоскости XZ , мм (рис. 8.14).

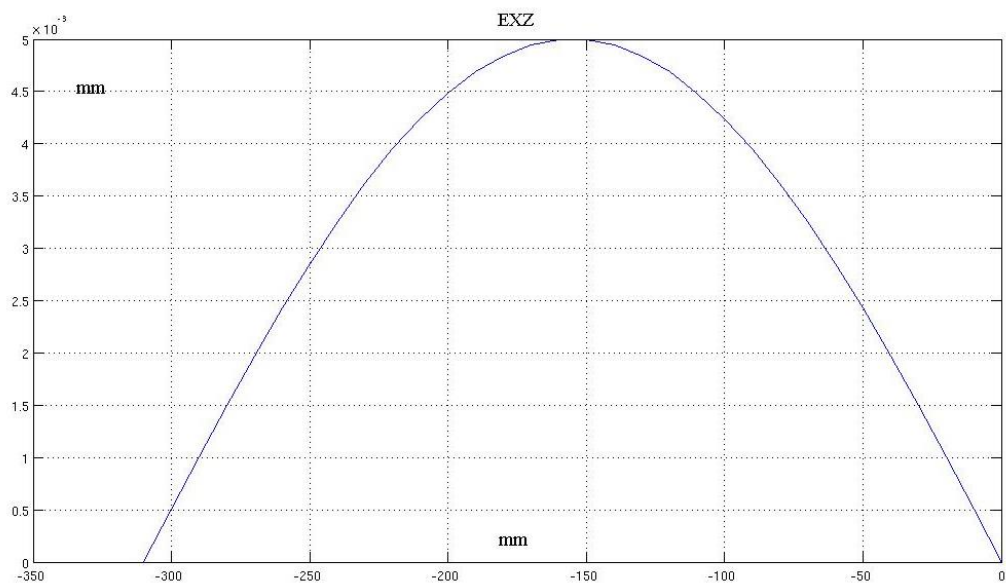


Рис. 8.14 (5 мкм)

15) EYZ отклонения от прямолинейности движения шпиндельной бабки в плоскости $Y_2O_2Z_2$.

dy_z - отклонение от прямолинейности перемещения стойки в плоскости YZ, мм (рис. 8.15).

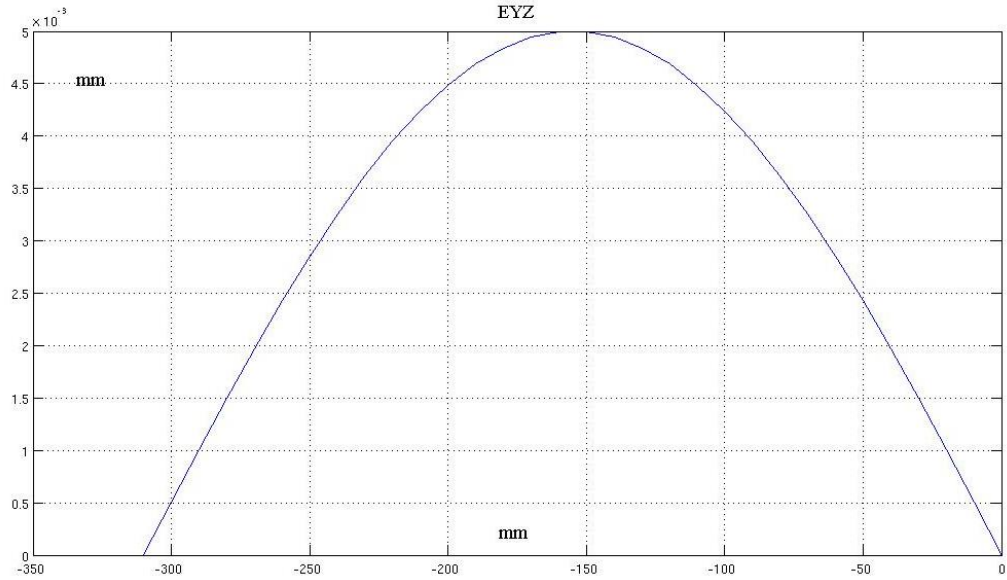


Рис. 8.15 (5 мкм)

16) EAZ поворот вокруг оси X_2 при движении шпиндельной бабки вдоль оси Z_2 .

dFI_x - отклонение угла поворота вокруг оси X, радианы (рис. 8.16).

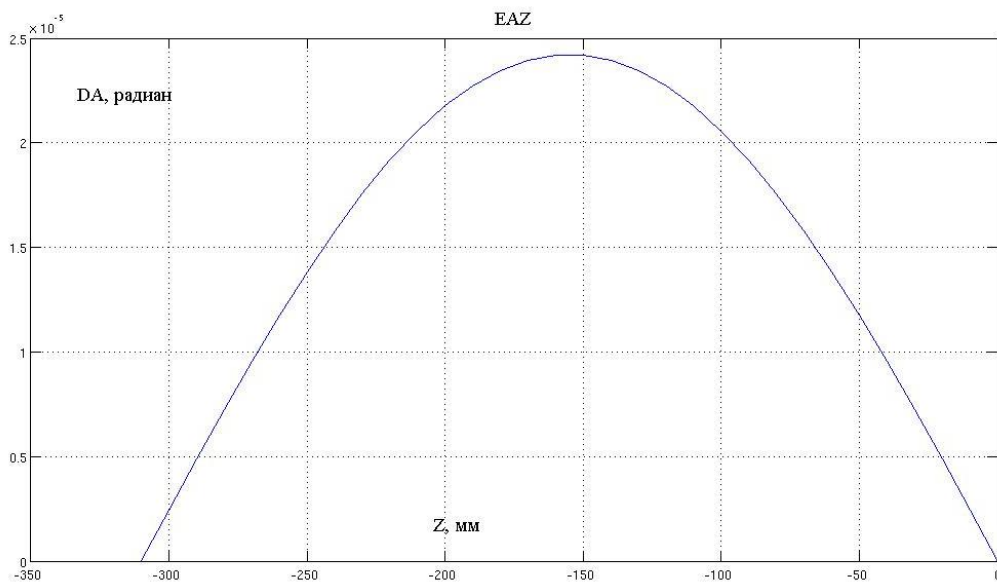


Рис. 8.16 (5")

17) EBZ поворот вокруг оси Y_2 , при движении шпиндельной бабки вдоль оси Z_2 .

dPI_z - отклонение угла поворота вокруг оси Y , радианы (рис. 8.17).

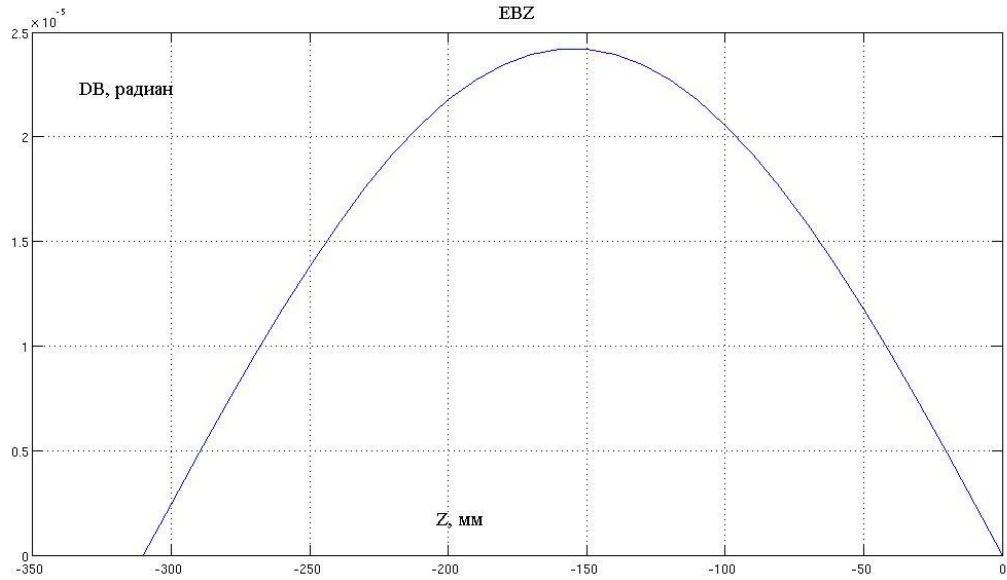


Рис. 8.17 (5")

18) ECZ отклонение угла поворота вокруг оси Z , радианы.

dTT_z - отклонение угла поворота вокруг оси Z , радианы (рис. 8.18)

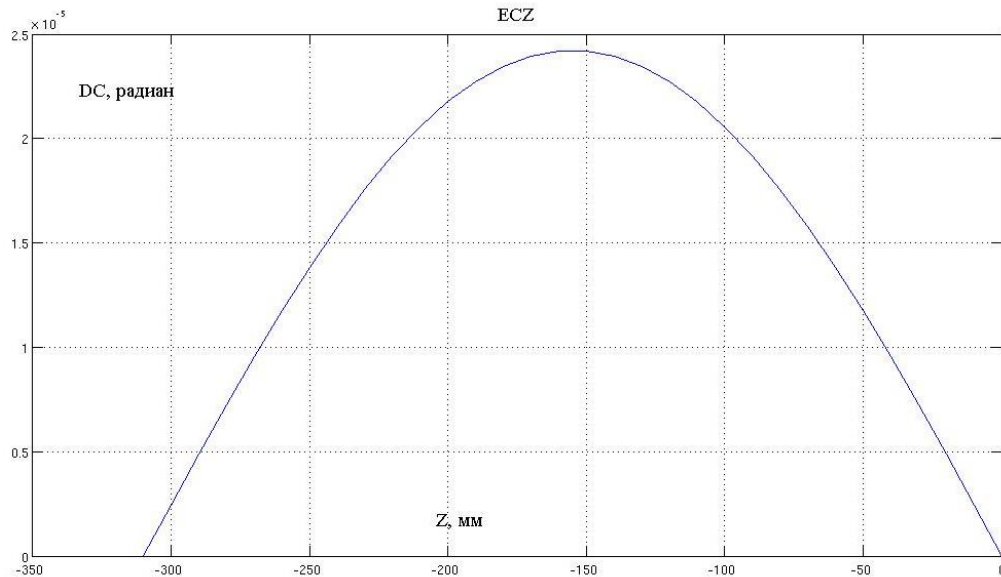


Рис. 8.18 (5")

Корпус планшайбы

19) ЕВВ отклонение позиционирования корпуса планшайбы по угловой координате В.

filj=0:5:180 координаты позиционирования по угловой координате В, град.

dfil_fil - отклонение позиционирования по В, угл.сек. (рис.8.19).

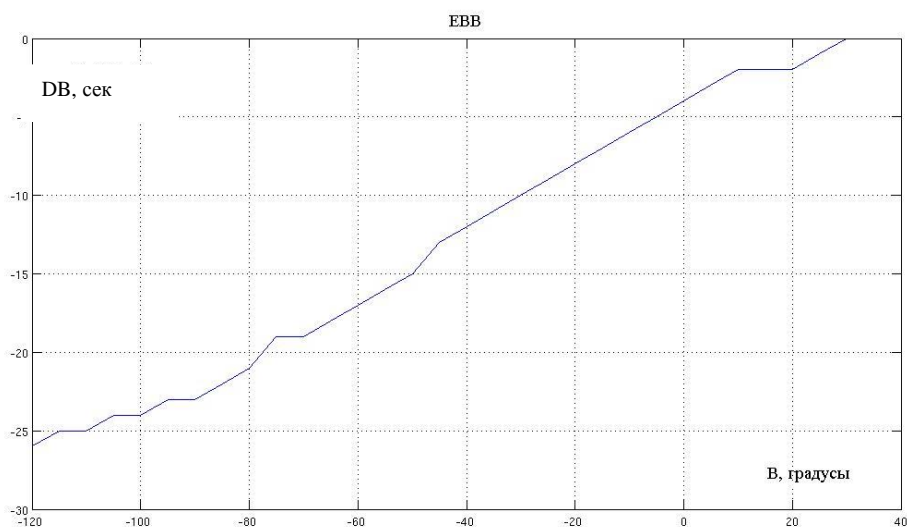


Рис. 8.19 (5")

20) ЕУВ аксиальное биение корпуса планшайбы (отклонение по оси Y_0 при вращении корпуса планшайбы).

dy_fil - аксиальное биение корпуса планшайбы, мкм (рис.8.20).

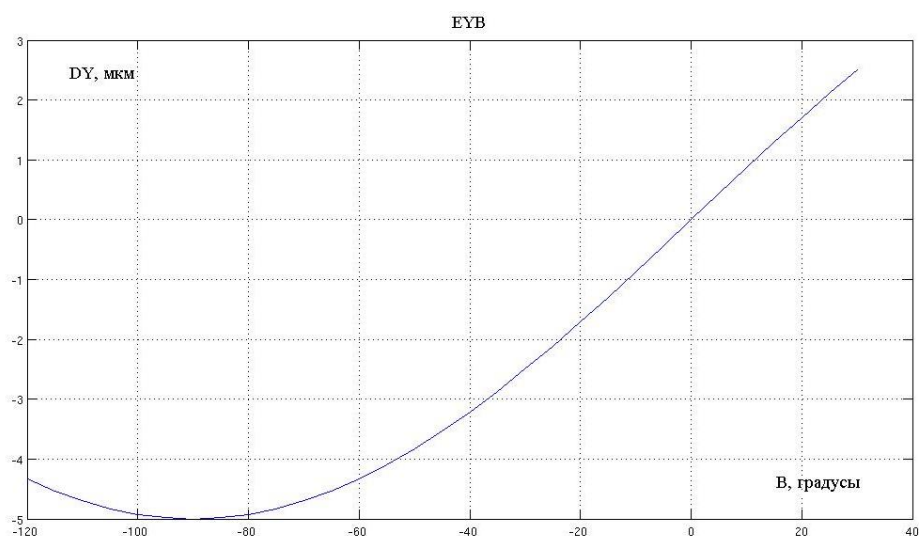


Рис. 8.20 (-5мкм)

21) EXB радиальное биение корпуса планшайбы (смещение оси поворота B по координате X_0 , эксцентриситет).

dx_fII - радиальное биение корпуса планшайбы в направлении оси X , мм (рис. 8.21).

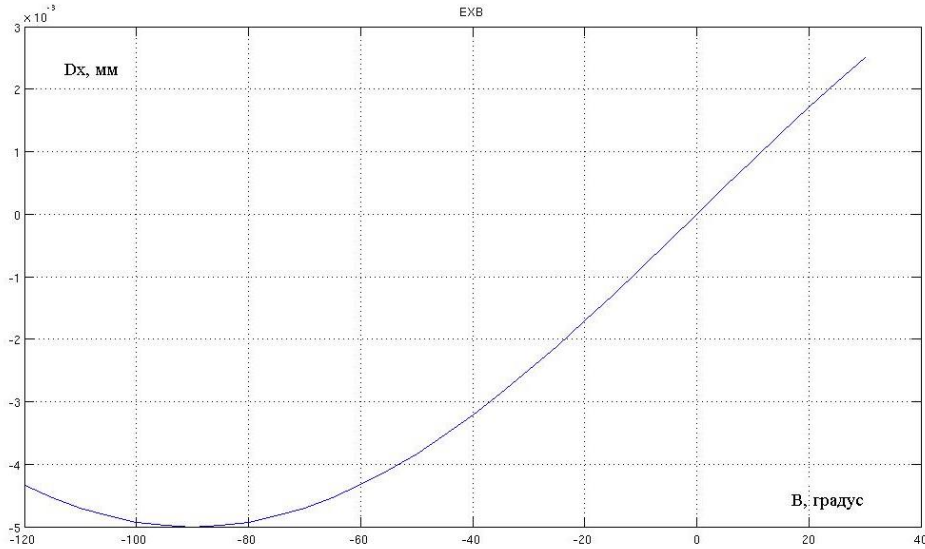


Рис. 8.21 (-5мкм)

22) EZB радиальное биение корпуса планшайбы (смещение оси поворота B по координате Z_0 , эксцентриситет).

dz_fII - радиальное биение корпуса планшайбы в направлении оси Z , мм (рис. 8.22).

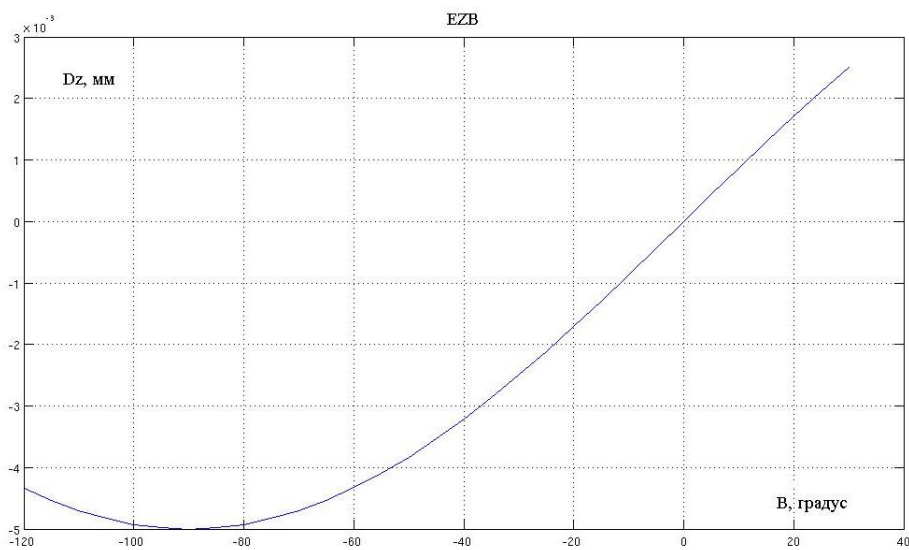


Рис. 8.22 (-5мкм)

23) ECV разворот оси поворота В корпуса планшайбы в плоскости $Y_0O_0X_0$.

dpsiyox_fil - отклонения (разворота) оси В (корпуса планшайбы) в пл. YOX , радианы (рис. 8.23).

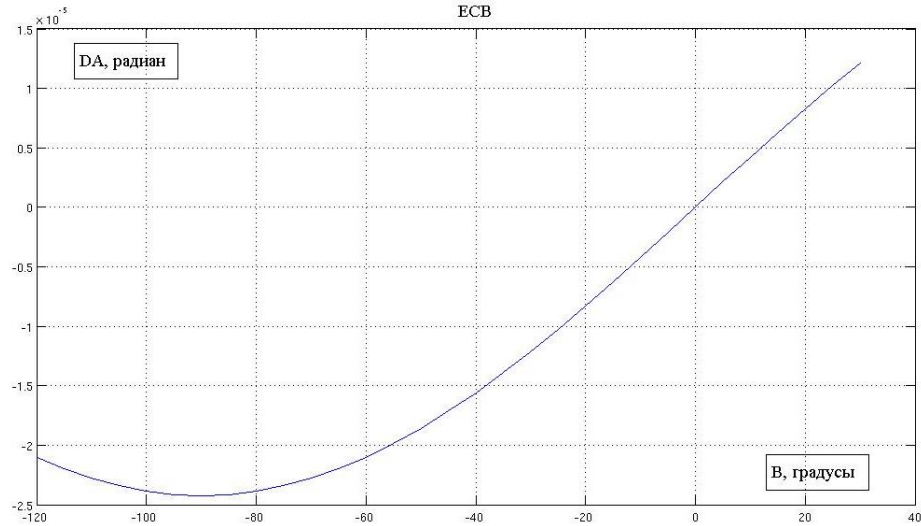


Рис. 8.23 (5")

24) EAB разворот оси поворота В корпуса планшайбы в плоскости $Y_0O_0Z_0$.

dpsiyoz_fil - отклонения (разворота) оси В (корпуса планшайбы) в пл. YOZ , радианы (рис. 7.24).

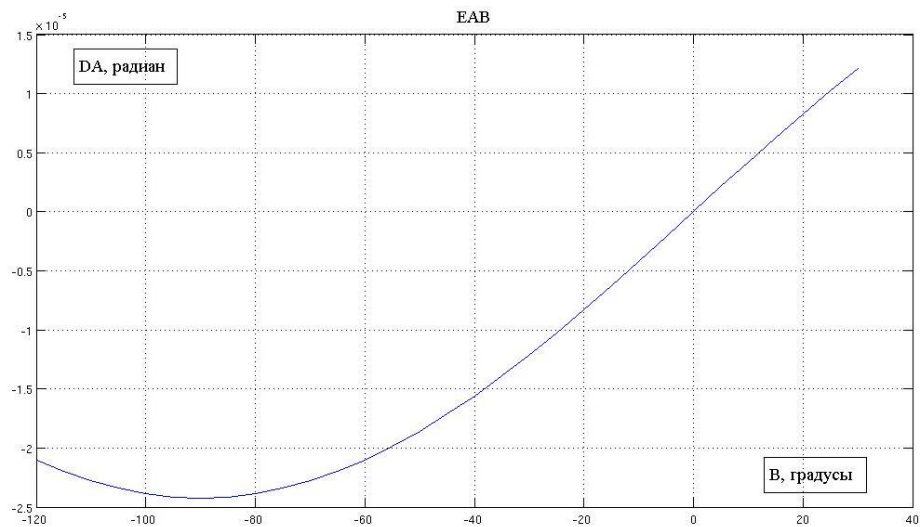


Рис. 8.24 (5")

Планшайба

25) ECC отклонение позиционирования планшайбы по угловой координате C .

$f_{IIj}=0:5:360$ координаты позиционирования по угловой координате C , град.

df_{II_fiII} - отклонение позиционирования по угловой координате C , угл.сек (рис. 8.25).

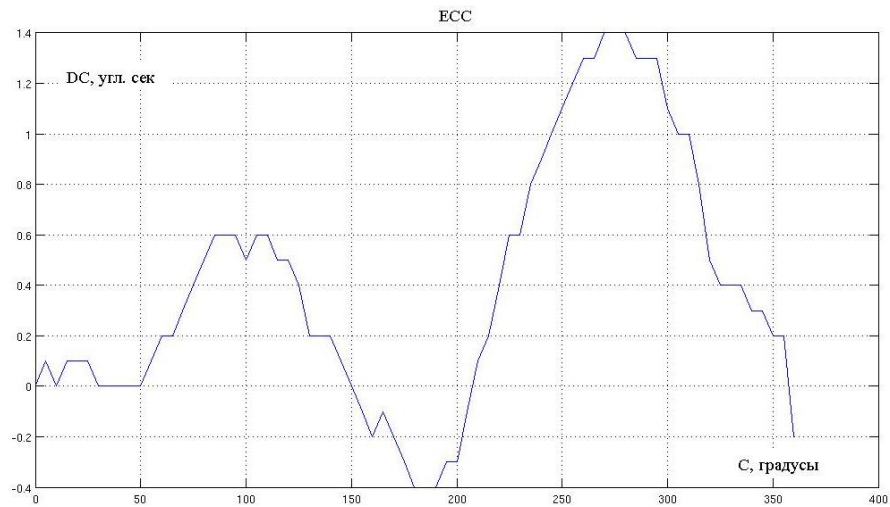


Рис. 8.25 (1,4")

26) EZC аксиальное биение планшайбы, (отклонение по оси Z_4 при вращении планшайбы).

dz_fiII - аксиальное биение планшайбы, мкм (рис. 8.26).

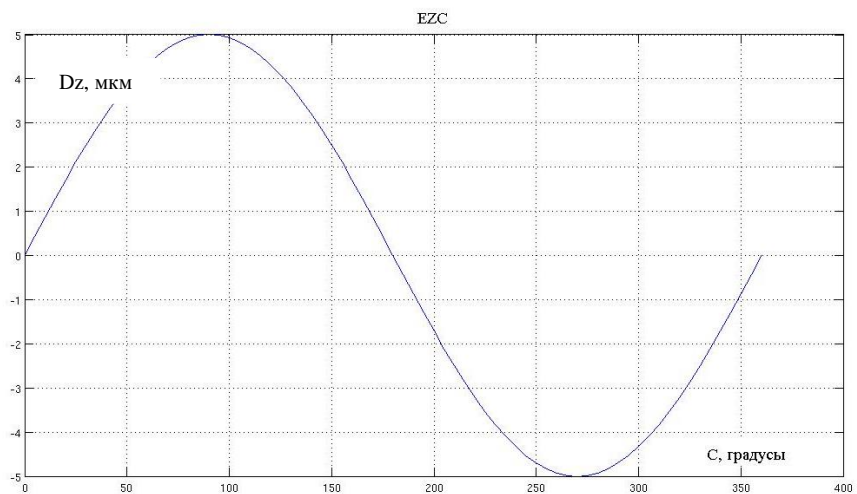


Рис. 8.26 (5мкм)

27) EXC радиальное биение планшайбы (смещение оси поворота С по координате X_4 , эксцентриситет).

dx_fiII - радиальное биение планшайбы в направлении оси X в функции угла поворота планшайбы, мкм (рис. 8.27).

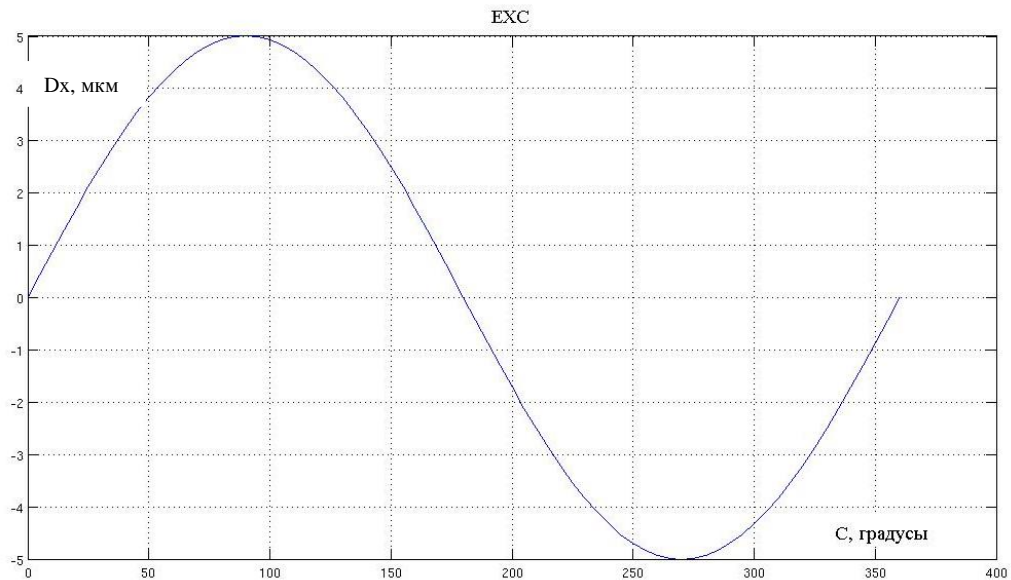


Рис. 8.27 (5мкм)

28) EYC радиальное биение планшайбы (смещение оси поворота С по координате Y_4 , эксцентриситет).

dy_fiII - радиальное биение планшайбы в направлении оси Y, мкм (рис. 8.28).

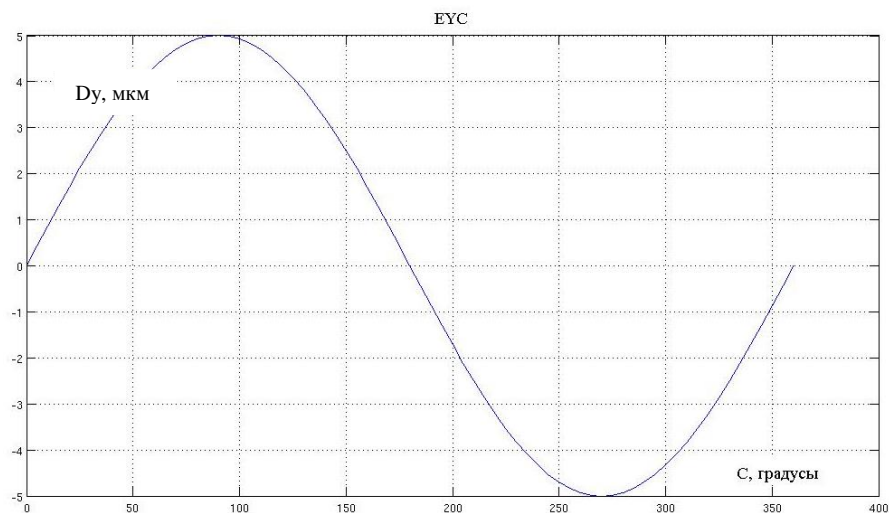


Рис. 8.28 (5мкм)

29) EBC разворот оси поворота С планшайбы в плоскости $Z_4O_4X_4$.

dpsiyox_fiП - отклонения (разворот) оси С (планшайбы) в пл. XOZ, радианы (рис. 8.29).

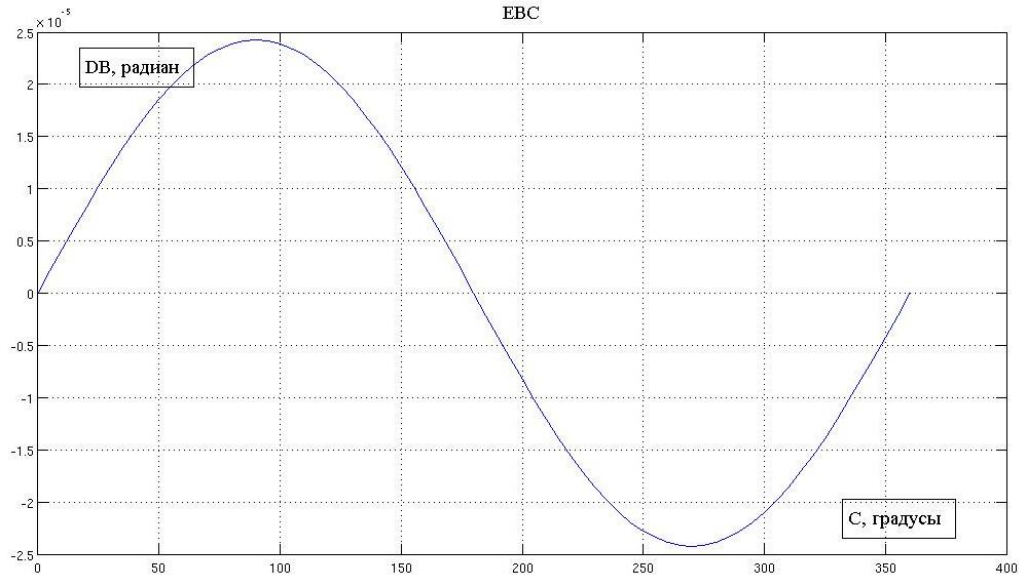


Рис. 8.29 (5")

30) EAC разворот оси поворота С планшайбы в плоскости $Z_4O_4Y_4$.

dpsiyoz_fiП - отклонения (разворот) оси (планшайбы) в пл. YOZ, радианы (рис. 8.30).

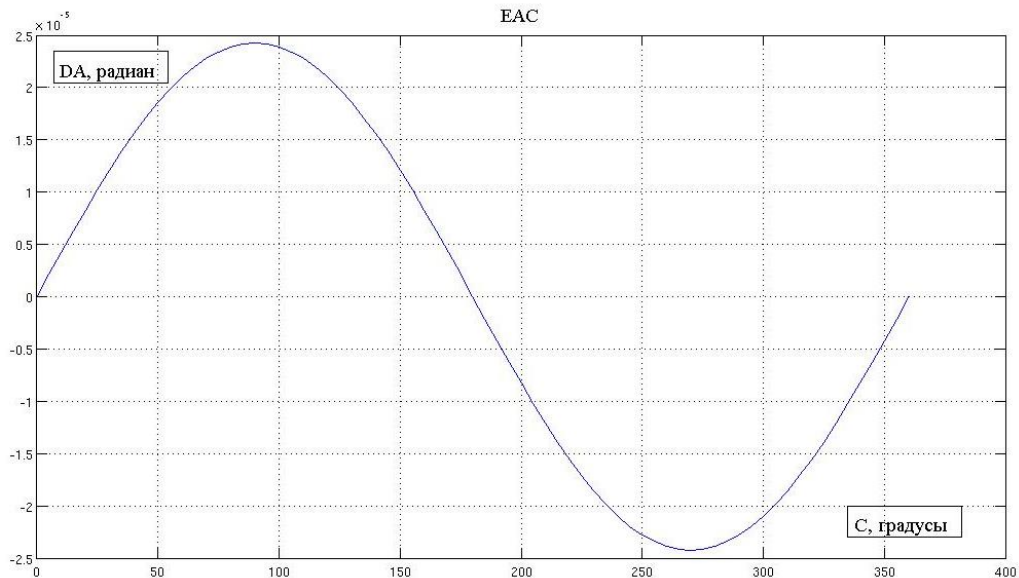


Рис. 8.30 (5")

ПРИЛОЖЕНИЕ № 6

Матрица чувствительности

e(i)	Критерий DD, мм	Критерий DMAX, мм
1	0.001512258016516	0.001588899429027
2	-0.000335356153752	-0.001455332654968
3	-0.001140002379164	0.001032117018475
4	-0.000515781196776	0.000511642610200
5	0.000269690354342	0.000690060491560
6	0.000000012655098	0.000000004396740
7	-0.000513097556727	0.000905283578699
8	0.000422892050985	0.001205697503814
9	0.000524941039048	0.000752185661219
10	-0.001733903881626	-0.002437522893977
11	-0.001144271308021	-0.001136912043978
12	0.002709454057772	0.005526384534555
13	0.004719195261928	0.005724035703888
14	-0.000965145529052	-0.001172459630369
15	-0.001089454005938	-0.000584252079503
16	-0.000936715979797	-0.002372649789451
17	-0.000972735793938	0.002085521958271
18	-0.000905196410181	-0.000944701926976
19	-0.002554553444526	0.009578771299161
20	0.002011646194761	0.007145901829482
21	0.000440505459885	-0.005350658299512
22	0.002365087406203	0.002665184066989
23	-0.002135870545522	-0.002135870545522
24	0.000815913950369	0.000815913950369
25	0.002474609358026	0.002474609358026
26	-0.006041960796572	-0.007056503063544
27	0.000683380074282	0.001073728175879
28	0.000301158661445	0.001361097870149
29	0.001636193574361	-0.004949256502668
30	0	0
31	0	0
32	-0.004431066575456	-0.002761446239159
33	0.001098106142417	0.001098106142417
34	-0.001051759101443	-0.001051759101443
35	0.002972111913731	0.002972111913731
36	-0.000231257209634	-0.000231257209634
37	-0.000044349521172	-0.000044349521172
38	-0.000637009847915	0.000565766970953
39	0.002944680892146	0.000466208854669
40	0	0
41	0	0