

Фельдман В.Д.

Кинематометрия – история и современность.

Известные и малоизвестные подробности о возможностях метода углублённого диагностирования технического состояния механических передач.

1. Введение.

В последнее время появляется довольно много публикаций как зарубежных [1], [2], [3],[4],[5], так и отечественных [6],[7] авторов, посвящённых вопросам контроля и диагностирования зубчатых механизмов с использованием кинематометров.

Эта ситуация не может не радовать, так как, по нашему мнению, кинематометрия *) является одним из наиболее информативных методов контроля и диагностирования технического состояния машин и механизмов, в состав которых входят зубчатые и винтовые передачи, подшипники качения и скольжения, муфты и т.п. звенья кинематических цепей.

*) Примечание: Основные понятия и определения, связанные с контролем кинематической точности механизмов, рассмотрены в приложении 1.

Указанный метод может иметь эффективное применение, как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации машин и механизмов.

По сравнению с близкими по назначению и широко применяющимися в настоящее время методами диагностирования, основанными на измерении и анализе шума и вибрации машин, данный метод имеет ряд принципиальных особенностей и преимуществ, из которых можно выделить как минимум четыре наиболее важные.

Во-первых, кинематометрия является **прямым методом диагностирования**, что позволяет без разборки механизма по результатам измерений определять не только вид дефекта того или иного из его звеньев, но и оценивать величину и степень развития данного дефекта.

Полученные с использованием этого метода данные о величине кинематической погрешности и её отдельных составляющих могут быть легко сопоставлены с допусками, установленными для контролируемых механизмов в нормативной и/или конструкторской документации, что существенно облегчает постановку диагноза.

Кроме того, эти же данные могут быть использованы для расчета динамических нагрузок, возникающих при работе машины, что повышает достоверность прогнозирования её эксплуатационного ресурса.

Во-вторых, данный метод обеспечивает возможность контроля и диагностирования низкооборотных машин и механизмов (зубообрабатывающих станков, редукторов антенных приводов систем наведения и т.п.), что практически невозможно в случае использования виброакустических методов.

Кроме того, при необходимости, современные кинематометры могут применяться при проведении статических измерений, позволяющих, например, выявлять деформации валов или величины зазоров в механических передачах.

Третьим важным достоинством данного метода является то, что он обладает повышенной чувствительностью, позволяющей измерять геометрические погрешности кинематических звеньев с разрешающей способностью для угловых перемещений до 0.3 угловых секунд, а для линейных до 0.1 мкм. Причём, при необходимости, разрешающая способность метода может быть повышена в 5-10 раз за счёт использования голографических или лазерных датчиков.

Эта особенность позволяет использовать контроль кинематической точности **для выявления дефектов машин на самой ранней стадии их развития.**

Ещё одним (четвёртым) положительным качеством кинематометрии является то, что данный метод обладает высокой помехозащищённостью.

С одной стороны это проявляется в том, что на результаты измерения кинематической погрешности диагностируемого механизма практически не оказывает влияние работа соседних механизмов.

С другой стороны в спектре сигнала кинематической погрешности механизма практически полностью отсутствуют паразитные составляющие, связанные с резонансными колебаниями его корпусных деталей. В случае использования виброакустических методов диагностирования эти составляющие в той или иной степени обязательно присутствуют. Более того, при определённых условиях они могут существенно исказить реальную картину и приводить к ошибочным выводам при постановке диагноза.

Учитывая то обстоятельство, что в некоторых последних публикациях (особенно зарубежных) результаты применения приборов кинематического контроля рассматриваются авторами практически как «откровения», ранее почти неизвестные широкому кругу специалистов, нам хотелось бы поделиться с коллегами своим видением этой проблемы, базирующимся на более чем сорокалетнем опыте работы в данном направлении.

2. История вопроса.

2.1. Отечественная школа кинематометрии.

Наше предприятие начало заниматься вопросами контроля кинематической точности в начале 70-х годов.

К тому времени уже сложилась отечественная школа кинематометрии, которая базировалась на работах А.В. Левашова [9], [10], С.Г. Партенского [11], Л.А. Архангельского, Г.И. Ткачевского, Г.А.Лившица [12],[13], Б.А.Тайца [14], [15] и ряда других исследователей.

В этих работах рассматривались теоретические и практические аспекты кинематометрии, основанные на использовании электромеханических приборов кинематического контроля, например таких, как кинематомер разработки ЦНИИТМАШа или кинематомер завода «Комсомолец».

Особую роль в становлении отечественной кинематометрии сыграл В.Ф.Ионак, деятельность которого на длительное время вперёд предопределила вектор развития данного направления науки и техники в нашей стране.

Его монография «Приборы кинематического контроля» [16] до настоящего времени остаётся наиболее полной и глубокой работой, рассматривающей теоретические и прикладные вопросы проверки кинематической точности различных механизмов с использованием кинематомеров.

В 60-е - 80-е годы прошедшего века под его руководством в НИИПТМАШе (г. Краматорск) было создано целое семейство электронных кинематомеров типа КН (КН-3, КН-6, КН-7 и др.), в которых был реализован фазовый метод измерения кинематической погрешности.

Причем прибор КН-7У был единственным и наиболее распространённым в то время отечественным кинематомером, серийный выпуск которого был налажен в конце 70-х годов на Челябинском инструментальном заводе.

К особым заслугам В.Ф.Ионака следует также отнести то, что ему удалось решить задачу по переводу проверки кинематической точности оборудования из области

сложных научных исследований в сферу рутинной процедуры, выполняемой метрологическими службами предприятий. Для этого им были разработаны технология проверки станков и редукторов, методика обработки и анализа кинематограмм, а так же универсальная оснастка (пантографы, регулируемые основания и т.п.), облегчающая установку и выверку датчиков прибора практически на любом контролируемом объекте.

3. Наш путь в кинематометрии.

3.1. Первые шаги.

Как мы уже отмечали выше, наше предприятие – СКБ «Индикатор» начало работу в области кинематометрии в начале 70-х годов.

В то время перед судостроением, в министерской структуре которого находилось наше предприятие, стояла задача существенного повышения качества всей номенклатуры выпускаемых в отрасли зубчатых передач. Особенно тех, которые входили в составе турбинных и приборных редукторов.

Решение этой задачи было практически невозможно без повышения точности отраслевого парка зубообрабатывающего оборудования.

На первом этапе этой работы наши специалисты были ориентированы на использование опыта В.Ф.Ионака, аппаратурой которого (кинематомерами КН-6 и КН-7) было оснащено одно из подразделений нашего предприятия.

Указанная аппаратура позволяла осуществлять контроль кинематической точности практически всех видов зубофрезерных и зубодолбёжных станков с диаметрами обработки от 50 мм до 5000 мм без ограничения по степени их точности, в том числе и станков сверх высокого класса точности (класс «С»).

С использованием этой аппаратуры и методологии по проверке кинематической точности, разработанной в НИИПТМАШе, нами было начато масштабное комплексное обследование технического состояния зубообрабатывающего оборудования, эксплуатируемого на машиностроительных и приборостроительных предприятиях судостроительной отрасли. Причём, только за 3 первых года работы было проведена проверка кинематической точности более чем 300 станков.

В результате проведённой работы удалось собрать значительный по тем временам статистический материал, использованный в дальнейшем для разработки отраслевой системы технического обслуживания и ремонта зубообрабатывающего оборудования.

В процессе проведения первоначального обследования было установлено, что около 80 % проверенного оборудования по характеристикам кинематической точности не соответствовало на момент проверки паспортному классу точности.

Причём у более чем 60 % проверенных станков точностные характеристики были ниже нормального класса точности, установленного соответствующими стандартами (ГОСТ 659-67, ГОСТ 658-67 и т.п.).

Следует особо отметить, что помимо полезной метрологической информации, характеризующей технологические возможности существующего зубообрабатывающего оборудования, при проведении данной работы был накоплен практический опыт по восстановлению и повышению кинематической точности станков с использованием относительно несложных ремонтно-регулирующих операций.

При этом на практике была доказана возможность оперативного устранения ряда существенных дефектов кинематических цепей станков, в том числе:

- повышенной циклической погрешности червячной делительной передачи станка (устраняется путём регулировки зазоров в подшипниках делительного червяка);
- местных дефектов (забоин) на зубьях делительного колеса (устраняется путем выявления по кинематограмме конкретного дефектного зуба и устранения дефекта шабрением);
- повышенной циклической погрешности инструментального шпинделя (устраняется путём регулировки зазоров в подшипниках шпинделя);
- геометрических погрешностей пальцев гитары деления (устраняются путём восстановления посадочных мест пальца и заменой втулок);
- дефектов сменных колес гитары деления (устраняются забоины зубьев колёс или осуществляется замена колёс с изношенными посадочными отверстиями и серьёзными повреждениями зубчатых колёс).

Это позволило (при участии ремонтных служб обследованных предприятий) с минимальными затратами восстановить, а в некоторых случаях и повысить кинематическую точность более чем 25% проверенных станков.

Кроме того, по результатам обследований был составлена база данных типовых дефектов кинематических цепей станков, использование которой дало возможность формализовать процедуру постановки диагноза и тем самым существенно облегчить работу широкого круга специалистов, задействованных в области кинематометрии.

Некоторые примеры (иллюстрации) типовых дефектов зубофрезерных станков и комментарии к ним приведены в приложении 2.

3.2. Развитие идей.

Позитивные результаты, достигнутые при внедрении методов и средств кинематометрии для контроля и диагностирования зубообрабатывающего оборудования, позволили продолжить проведение данной работы в трёх основных направлениях.

3.2.1. Контроль кинематической точности и диагностирование оборудования.

Первое направление предусматривало расширение услуг по комплексному контролю и диагностированию технического состояния металлообрабатывающего оборудования на предприятиях отрасли.

Начиная с середины 70-х и до окончания 80-х годов нашими специалистами были разработаны и внедрены технологии контроля кинематической точности, обеспечивающие возможность диагностирования практически всех типов зубообрабатывающего оборудования, в том числе: зубофрезерных и зубодолбёжных станков, зубошлифовальных станков с червячным кругом, зубошлифовальных станков с единичным делением, зубострогальных станков, зуборезных и зубошлифовальных станков для обработки спиральных конических зубчатых колёс.

За это время было обследовано более **1500** единиц зубообрабатывающего оборудования. Причём статистика, накопленная для ряда наиболее ответственных прецизионных станков, лимитировавших технологические возможности предприятий, насчитывала до **30-40** и более повторных проверок.

Это позволило организовать эксплуатацию указанного оборудования в режиме планово-диагностического обслуживания, что существенно минимизировало затраты по поддержанию точностных характеристик станков на требуемом для производства уровне.

Помимо проверки зубообрабатывающего оборудования методы кинематометрии были внедрены при контроле и диагностировании цепей подач токарных и резьбошлифовальных станков, а также приводов линейных перемещений станков с числовым программным управлением.

При этом в качестве датчиков линейных перемещений использовались либо фотоэлектрические линейные датчики собственного изготовления, либо лазерный интерферометрический датчик, обеспечивающий высокую точность измерений.

В приложении 3 рассмотрены примеры результатов контроля и диагностирования приводов по координатам станков мод. ИР-800, которые могут быть интересны производителям станков с ЧПУ, а также службам, которые занимаются их ремонтом и эксплуатацией.

Следует также отметить, что в эти же годы был накоплен определённый опыт контроля кинематической точности различных типов зубчатых передач, в том числе: цилиндрических и червячных редукторов, волновых передач и т.п. механизмов.

3.2.2. Модернизация зубофрезерных станков.

В 70 - 80 –е годы на ряде промышленных предприятий имелась объективная потребность в восстановлении и повышении точности червячных делительных пар находящихся в эксплуатации зубофрезерных станков.

Одним из наиболее эффективных путей решения данной проблемы, учитывающим её технологические и экономические аспекты, являлась модернизация станков, предусматривающая встраивание в цепь обката-деления механического коррекционного устройства.

Классическая схема механического коррекционного устройства была разработана в 50-е годы в ЦНИИТМШе под руководством профессора Л.А. Архангельского [12].

В 50-80-е годы эти устройства нашли широкое применение не только при модернизации зубофрезерных станков, но в случае изготовления новых станков, к точности которых предъявлялись повышенные требования.

В частности, подобными устройствами оснащались, разработанные в ЭНИМСе, мастер-станки (мод. 543, мод.544М, мод. 546М) [19], которые предназначались для нарезания червячных делительных колёс зубообрабатывающих станков. Аналогичные устройства устанавливались также на некоторых моделях зубофрезерных станков фирмы TOS (Чехословакия).

Следует особо отметить, что отладка и эксплуатация механических коррекционных устройств требует обязательного использования кинематомера, с помощью которого осуществляется профилирование и настройка кулачков, компенсирующих накопленную и циклическую погрешности червячной делительной пары станка.

Подробное описание конструкции коррекционного устройства ЦНИИТМАШа и технологии его отладки на зубофрезерных станках приведено в упоминавшихся выше работах [12] и [16].

На базе данного технического решения нашими специалистами была разработана конструкторская документация на целую гамму коррекционных устройств (для 16 различных моделей), которая была использована при модернизации более чем 20 единиц оборудования с диаметрами обработки зубчатых колёс от 200 мм до 3000 мм.

Причем, в результате модернизации точностные характеристики этих станков были повышены на 1-3 класса.

В приложении 4 приведен пример модернизации зубофрезерного станка мод. URH30 фирмы Давид Браун, позволившей повысить его фактическую кинематическую точность с нормального класса (класс Н) до уровня особо высокого класса (класс А).

3.2.3. Разработка аппаратуры кинематического контроля.

В середине 70-х годов в СССР серьёзное внимание уделялось вопросам технического перевооружения оборонных отраслей промышленности. Строились новые цеха и предприятия, осуществлялись массовые закупки передового технологического оборудования за рубежом, налаживалось производство современного оборудования на отечественных станкостроительных заводах.

При этом было ясно, что эффективная эксплуатация этого оборудования не возможна без использования методов и средств технической диагностики, в числе которых важное место занимали приборы кинематического контроля.

Первый кинематомер модели РЦ-4 собственной конструкции был изготовлен на нашем предприятии уже в 1975 году.

Следует отметить, что в этом приборе в значительной степени использовались ноу-хау, которые ранее были реализованы в кинематомерах В.Ф.Ионака (например, в приборе КН-6).

Данному прибору были присущи все достоинства и недостатки кинематомеров, в основу работы которых был положен фазовый метод измерения кинематической погрешности. В частности, при относительно высокой точности (2.5 – 5 угловые секунды) и разрешающей способности (0.1 – 0.2 угловые секунды) измерений, эти приборы имели определённые ограничения как по выбору возможных для проверки передаточных отношений, так и по допустимому амплитудному диапазону измеряемой погрешности.

Приборы данной модели использовались для оснащения выездных бригад, проводивших контроль и централизованное обслуживание зубообрабатывающего оборудования на машиностроительных и приборостроительных предприятиях судостроительной отрасли.

Работы по созданию новых моделей аппаратных средств контроля кинематической на нашем предприятии продолжались вплоть до конца 80-х годов.

За это время были созданы несколько вариантов кинематомеров, принцип действия которых существенно отличался от кинематомеров НИИПТМАШа.

Ряд приоритетных технических решений, использованных в данных приборах их разработчиками Ю.Н. Шульгиным и С.В. Оськиным, был защищён авторскими свидетельствами [17], [18].

В частности, был создан кинематомер РЦ-5, предназначенный для проверки цепей подач зубофрезерных станков, который достаточно подробно описан в работе [16].

Помимо него также были изготовлены опытные образцы ряда других приборов, предшествовавшие созданию в середине 80-х годов наиболее совершенного по меркам того времени кинематомера РЦ-44 (КИ-01).

РЦ-44 стал прибором нового поколения, в конструкции которого были реализованы элементы цифровой обработки сигнала.

По своим техническим возможностям он превосходил большинство известных в то время кинематомеров, в том числе и зарубежных – TOSIMO-JS (Чехословакия) и GPG05 фирмы «Orpton»(ФРГ) [16].

Сохраняя основные достоинства фазовых кинематомеров (точность и разрешающую способность), он позволял осуществлять проверку кинематических цепей с практически любыми передаточными отношениями (от 1/999 до 999/1), что было особенно важно при проведении контроля редукторов, а также зубчатых и винтовых передач.

Комплект поставки прибора включал в себя широкую номенклатуру угловых и линейных измерительных преобразователей, позволявших использовать его для контроля практически любых кинематических цепей, конечные звенья которых совершали угловые и/или линейные перемещения.

В отличие от большинства других известных кинематомеров того времени прибор РЦ-44 прошёл отраслевые испытания по методике, утвержденной в ГНИИМ (г. Харьков), и начал изготавливаться серийно.

В период с 1985 по 1991 годы было изготовлено более 20 комплектов кинематомеров РЦ-44 (что беспрецедентно для данного вида приборов), которыми оснащались ведущие предприятия судового и энергетического машиностроения, аэрокосмической промышленности и ряд других производств.

Следует отметить, что все рассмотренные выше кинематомеры (как наши, так и производства других фирм) имели один существенный недостаток, который заключался в том, что результаты измерений фиксировались в виде графиков временной функции (кинематограмм) на ленте самопишущего прибора. Углублённый анализ и расшифровка этих графиков, необходимые для постановки диагноза, были достаточно трудоёмки и требовали от исполнителей высокой квалификации и определённого практического опыта.

3.2.4. Цифровой кинематомер и «новые времена».

Интенсивное внедрение вычислительной техники, которое наблюдалось в 80-х годах прошлого века на отечественных предприятиях, дало мощный толчок к переходу на новый качественный уровень для многих направлений науки и техники. Кинематометрия в этом случае также не стала исключением.

Уже к 1991 году нашими специалистами был разработан первый опытный вариант цифрового кинематомера, выполненного на платформе персонального компьютера.

Новый прибор получил название «Диакин», которое расшифровывалось как «Диагностический кинематомер».

В этом приборе удалось реализовать всю совокупность функций, необходимых для комплексного автоматизированного диагностирования механизма по параметрам кинематической точности, в том числе:

- функцию описания объекта контроля и диагностирования, описывающую основные элементы кинематической схемы объекта и допуски на контролируемые параметры;
- функцию измерения кинематической погрешности;
- функцию автоматизированной обработки результатов измерения и постановки диагноза;
- функцию подготовки и распечатки протоколов проверки;
- функцию архивации результатов измерений.

Кроме того, в состав данного прибора был включен лазерный интерферометрический датчик линейных перемещений собственного изготовления, что позволяло в дополнение к проверкам кинематической точности проводить контроль точности позиционирования приводов по координатам станков с ЧПУ.

Осенью 1991 г. опытный образец кинематомера «Диакин» впервые с успехом демонстрировался на Пловдивской ярмарке в Болгарии.

Этим важнейшим для нас событием, случайно совпавшим с коренными политическими и социально-экономическими переменами, происходившими в нашей стране в то время, завершился наиболее плодотворный этап развития кинематометрии на нашем предприятии.

На этом этапе был создан тот интеллектуальный и материальный задел, который, несмотря на обвальное разрушение в 1990 – 2000-е годы основных отраслей отечественного машиностроения и в частности станкостроения, позволил нам частично сохранить и даже в чём-то развить данное научно-техническое направление.

В это непростое для всех время, в основном благодаря энтузиазму наших ведущих специалистов, удалось изготовить и внедрить пять комплектов кинематомера «Диакин», которые были поставлены на Навоиский горно-обогатительный комбинат (Республика Узбекистан), ОАО «Завод Редуктор», ОАО «Калужский турбинный завод», МГТУ «Станкин», ОАО «АвтоВАЗ».

В последующие 10 лет основное направление развития кинематометрии на нашем предприятии было связано главным образом с совершенствованием схмотехнических решений построения измерительно-вычислительного блока кинематомера, что выразилось в замене дискретной элементной базы прибора современными быстродействующими микропроцессорами.

Параллельно велись работы по расширению и совершенствованию программного обеспечения прибора.

В результате были созданы кинематомеры нового поколения («Диакин 2» и его более поздняя модификация «Диакин 3»), которые нашли применение на ряде ведущих предприятий энергомашиностроительного и аэрокосмического комплексов.

В частности, эти приборы используются на ОАО «Калужский турбинный завод», ОАО «Казанькомпрессормаш» и ОАО «Завод Редуктор» для проверки кинематической точности прецизионных зубообрабатывающих станков и зубчатых передач турбинных и червячных редукторов.

Указанные приборы также внедрены на ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», ОАО «Сибирские приборы и системы» и ФГУП «НИИПП» для испытаний кинематических приборных редукторов, используемых в специализированных приводах систем управления.

С кратким описанием и основными техническими характеристиками кинематомера «Диакин-3» можно ознакомиться в приложении 8.

Ряд практических примеров, позволяющих оценить технологические, диагностические и метрологические возможности, появившиеся при использовании современных цифровых кинематомеров, рассмотрены в приложениях 5, 6, 7.

4. Заключение

В заключение хочется отметить, что, несмотря на все очевидные достоинства, обсуждаемая в данной статье методология, основанная на измерении кинематической погрешности, ни в коем случае не может рассматриваться как единственно возможный (безальтернативный) способ контроля и диагностирования машин и механизмов.

По нашему мнению наиболее эффективные и оптимальные методы контроля и диагностирования должны выбираться с учётом конкретного типа машины, особенностей её конструкции, режимов работы и условий эксплуатации.

Более того, в большинстве случаев для получения исчерпывающей диагностической информации о техническом состоянии машины обычно требуется комплексное использование целого ряда известных методов, включающих в себя виброакустические измерения, термо- и тензометрию и другие способы контроля.

В число этих методов должна обязательно включаться и **кинематометрия**, которая вследствие ряда объективных и субъективных причин пока недостаточно востребована как у производителей сложной техники, так и у служб, занимающихся её эксплуатацией.

Автор надеется, что представленная в тексте статьи и приложениях информация, в основном посвященная вопросам практического использования данного метода, будет востребована специалистами, работающими в области контроля и диагностирования машин и механизмов, что позволит дать новый позитивный импульс в развитии **кинематометрии**.

Литература:

1. Remond D., and Play D. Advantages and Perspectives of Gear Transmission Error Measurement with Optical Encoders. 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, Paris, France, 1999, March 16-18.

2. R.G. Munro Measuring the kinematical accuracy worm gears. Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part C: Journal of mechanical engineering science., Volume 213, November, 4/1999, p. 381-388.
3. Dr.Eng. Akigo Horiuchi The measuring machine for angular transmission error of reducers. Information of products. MITI, Japan, 2004.
4. D. Remond, J.Mahffoudh From transmission error measurements to angular sampling in rotating machines with discrete geometry. Shock and vibration. Vol.12, number 2/2005, p.149-161.
5. Feng Lin The study of drive characteristic and experimental approach about planetary gearing mechanism. Modern applied science. Vol.4, № 12, December, 2010.
6. Д.В. Дерябин, А.Ф. Емельянов, Л.О. Штриплинг Измерение кинематической погрешности планетарных передач с помощью измерительного комплекса ИКТ-2М., сб. Технология и автоматизация атомной энергетики. Материалы отраслевой научно-технической конференции. , 12-14 мая 2004г.
7. С.И.Агапов Прибор для оценки кинематической погрешности зуборезного оборудования в производственных условиях. СТИН, 2006, №2, С.26-29.
8. А.Ю. Блохин Паспортизация редукторов вертолётов по параметрам вибрации при стендовых испытаниях. Доклад на Всероссийской конференции «Проблемы создания перспективных авиационных двигателей», Москва, 27.09.2005.
9. А.В. Левашов Определение кинематической точности зубофрезерных станков. Изд. Центр. бюро техинформации МСС СССР, М., 1952
10. А.В. Левашов Основы расчёта точности цепей металлорежущих станков. М., «Машиностроение», 1966.
11. Б.М. Партенский Опыт повышения кинематической точности делительной цепи зубофрезерных станков. «Станки и инструмент» № 1, Машгиз, 1951.
12. Л.А. Архангельской, Г.И. Ткачевской, Г.А.Лившиц Повышение кинематической точности зубофрезерных станков. М., Машгиз, 1954.
13. Л.А. Архангельской , Г.А.Лившиц, Г.И. Ткачевской Проверка кинематической точности станков. Справочник механика машиностроительного завода. Т.2., М., 1958.
14. Б.А. Тайц Точность и контроль зубчатых колёс. М., «Машиностроение», 1972.
15. Б.А. Тайц Контроль кинематической точности. М., МИЭМ, 1972.
16. В.Ф. Ионак Приборы кинематического контроля. М., «Машиностроение», 1981.
17. Ю.Н. Шульгин, С.В. Оськин А.С. №00977819 от 30.11.1982 г. Способ контроля кинематической погрешности передач.
18. С.В. Оськин, Ю.Н. Шульгин А.С. №01043484 от 23.09.1983 г. Устройство для контроля кинематической погрешности передач.

19. В.В. Бушуев, С.П. Налётов Тяжёлые зубообрабатывающие станки. М., Машиностроение, 1976
20. Руководящие технические материалы по комплексному контролю кинематической точности зубофрезерных станков с диаметром стола свыше 500 мм. Предприятие п/я Ю-9976 (СКБ «Индикатор»). Шифр ПМ 81.
21. Смирнов Г.И., Фельдман В.Д. Диагностирование металлорежущего оборудования по кинематическим и динамическим параметрам. Сборник научных трудов. Испытания, контроль и диагностирование гибких производственных систем. М. Наука, 1988
22. Паспорт и руководство по эксплуатации диагностического комплекса «Диакин-3». Шифр ИНД 07-017 .00.000 ПС и РЭ. ОАО «СКБ «Индикатор», С-Пб, 2010.

Приложение 1

Кинематическая точность.
Основные представления, понятия и определения.

Кинематометрия - научно-техническая дисциплина, изучающая комплекс вопросов, связанных с контролем кинематической точности машин и механизмов.

Она является одним из наиболее эффективных методов контроля и диагностирования технического состояния кинематических цепей различной сложности, в состав которых входят зубчатые и винтовые передачи, подшипники качения и скольжения, муфтовые соединения и т.п. звенья.

По результатам этого контроля могут быть определены основные составляющие кинематической погрешности механизма, анализ которых позволяет диагностировать его техническое состояние с глубиной до отдельного кинематического звена.

В процессе работы механизма его звенья взаимодействуют друг с другом по образующим контактными поверхностями. Наличие тех или иных дефектов этих поверхностей приводит к отклонению положения ведомого звена реального механизма от заданного идеального закона движения. Это отклонение, функционально связанное с циклом движения механизма, называют кинематической погрешностью.

В отличие от геометрической погрешности, характеризующей отклонение размеров и формы реальных звеньев от идеальных, кинематическая погрешность возникает лишь в процессе движения и взаимодействия звеньев.

Как указано в работе [16], под кинематической погрешностью понимается разность между действительным (измеренным) и номинальным (расчетным) перемещениями выходного звена механизма, которое определяется по отношению к его входному звену за полный цикл изменения относительного положения этих звеньев.

С учётом данного определения кинематическая погрешность механизма может быть описана формулой:

$$F_{ik} = \varphi_{1k} - \varphi_{2k}/u \quad (\text{п.1.1})$$

где F_{ik} – мгновенное значение величины кинематической погрешности в K -ой точке измерения;

φ_{1k} – величина углового или линейного перемещения тихоходного (выходного) звена механизма на момент измерения в K -ой точке;

φ_{2k} – величина углового или линейного перемещения быстроходного (входного) звена механизма на момент измерения в K -ой точке;

u - теоретическое передаточное отношение кинематической цепи механизма.

Из формулы п.1.1 следует, что имея информацию о мгновенных значениях перемещений входного и выходного звеньев механизма и зная его номинальное (теоретическое) передаточное отношение, можно контролировать изменение функции кинематической погрешности механизма на заданном пути перемещения его выходного звена.

На этом принципе работают специальные приборы – кинематомеры, предназначенные для проведения работ по контролю кинематической точности различных видов машин и механизмов.

На рис. п.1.1. представлена схема контроля кинематической точности редукторного механизма **1**, выполняемого с использованием современного цифрового кинематомера.

Как видно из схемы, при проведении кинематического контроля используются два датчика (преобразователя) угловых перемещений **2** и **3**, которые с помощью механических приспособлений **6** и **7** устанавливаются на конечные (выходное и входное) звенья контролируемой кинематической цепи механизма, в данном случае редуктора.

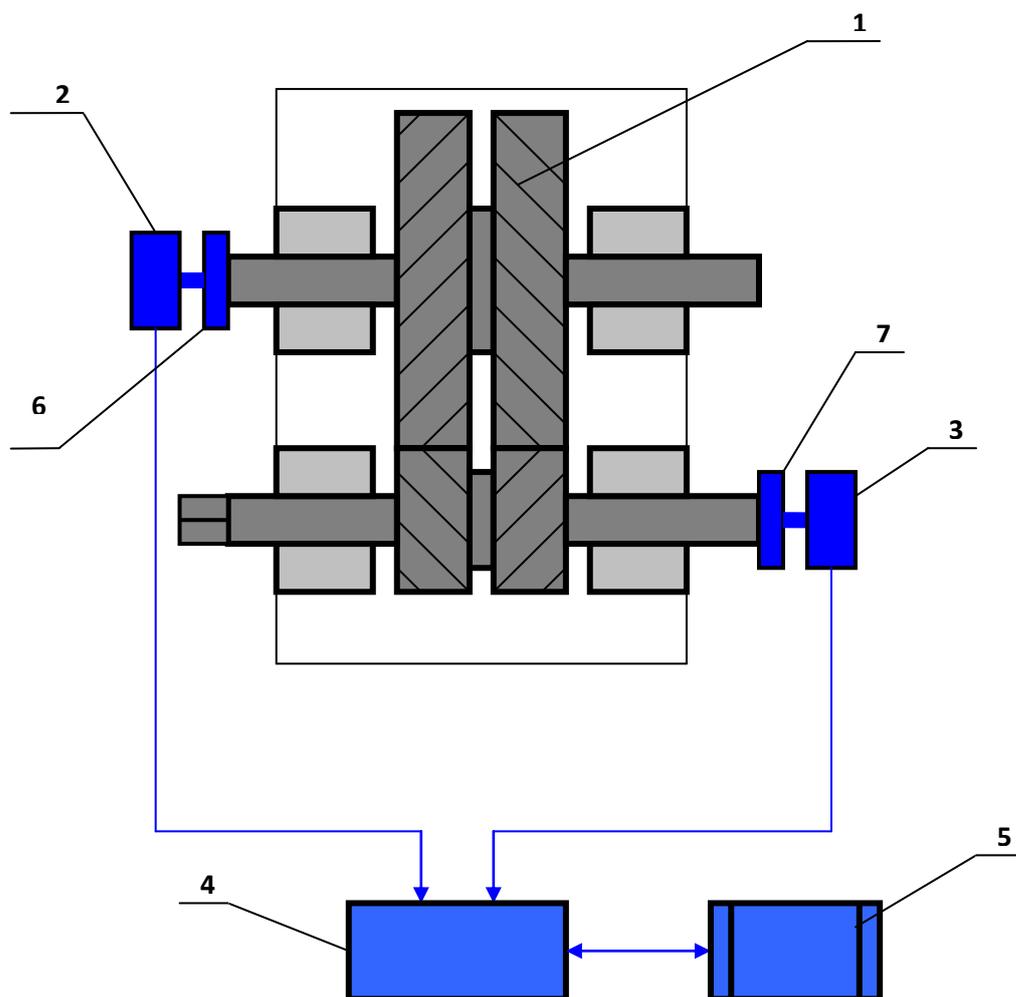


Рис. п.1.1. Схема контроля кинематической точности редукторного механизма с использованием цифрового кинематомера.

1. Редукторный механизм
2. Датчик угловых перемещений (установлен на выходном - тихоходном вале механизма)
3. Датчик угловых перемещений (установлен на входном - быстроходном вале механизма)
4. Измерительно-вычислительный блок кинематомера
5. Компьютер (ноутбук)

Перемещения конечных (входного и выходного) звеньев кинематической цепи преобразуется измерительными преобразователями в электрические сигналы (последовательности импульсов).

Сигналы с преобразователей поступают на соответствующие входы измерительно-вычислительного блока 4 кинематомера, в котором с помощью соответствующих

аппаратных счетчиков по каждому фронту сигнала осуществляются операции суммирования или вычитания, изменяющие общее содержимое счетчиков.

Информация о мгновенных значениях содержимого счётчиков запоминается в оперативной памяти измерительно-вычислительного блока кинематомера и используется для вычисления фактических величин мгновенных угловых перемещений $\varphi_{2к}$ входного и $\varphi_{1к}$ выходного валов контролируемого механизма, которое производится компьютером 5 в соответствии с формулами п.1.2 и п.1.3.

$$\varphi_{1к} = 1296000 * N_{1к} / Z_1 \quad (\text{п.1.2})$$

где $N_{1к}$ – мгновенное значение содержимого счётчика датчика выходного вала (количество импульсов, пришедших в счётчик с датчика выходного вала на момент измерения в K -ой точке);
 Z_1 – количество импульсов, генерируемых датчиком выходного вала за один оборот выходного вала.

$$\varphi_{2к} = 1296000 * N_{2к} / Z_2 \quad (\text{п.1.3})$$

где $N_{2к}$ – мгновенное значение содержимого счётчика датчика входного вала (количество импульсов, пришедших в счётчик с датчика входного вала на момент измерения в K -ой точке);
 Z_2 – количество импульсов, генерируемых датчиком входного вала за один оборот выходного вала.

Сохраняемые в памяти компьютера расчетные значения угловых перемещений входного и выходного валов подставляются в формулу п.1.1, с помощью которой рассчитываются мгновенные значения кинематической погрешности $F_{irк}$ контролируемого механизма на всём периоде измерений.

При проведении угловых измерений период измерения обычно принимается равным или кратным полному периоду перемещения выходного звена контролируемого механизма.

Например, для редукторного механизма этот период может выбираться равным или кратным периоду оборота выходного (тихоходно) вала редуктора, а для зубообрабатывающего станка – равным или кратным периоду оборота шпинделя изделия (стола станка).

На рис. п.1.2 представлен типичный график кинематической погрешности механизма (в данном конкретном случае червячного редуктора), построенный на периоде равном одному обороту его выходного (тихоходного) вала.

Алгебраическая разность максимального и минимального мгновенных значений кинематической погрешности, взятых на этом графике равна величине кинематической погрешности механизма F_{ir} , выявленной на выбранном периоде измерения.

F_{ir}

Погрешность, угл. сек.

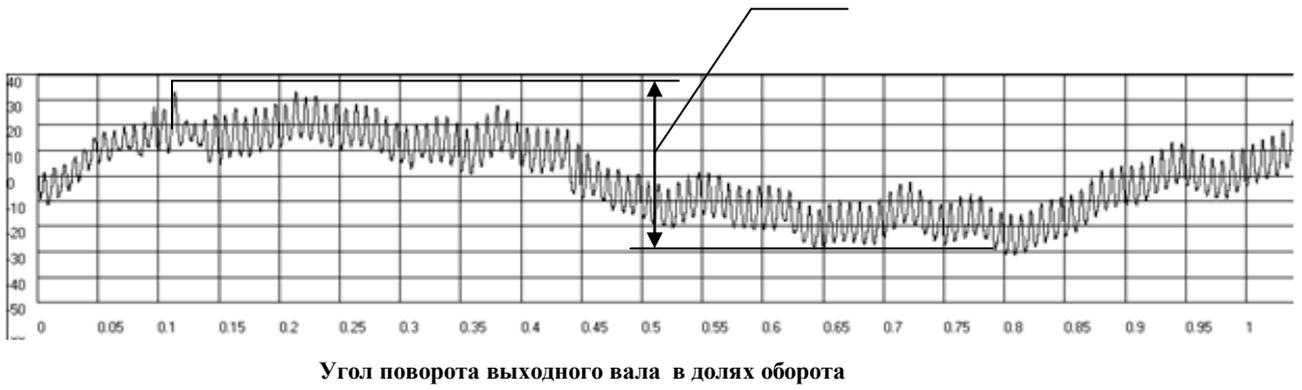


Рис. п.1.2. График временной функции кинематической погрешности механизма

Погрешность, угл. сек.



Рис. п.1.3. График временной функции накопленной погрешности механизма

Погрешность, угл. сек.

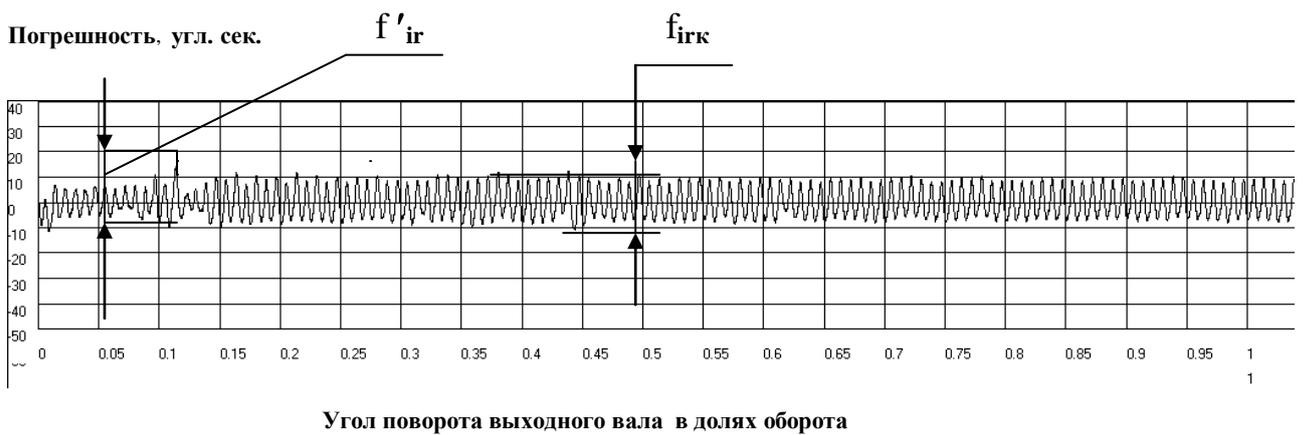
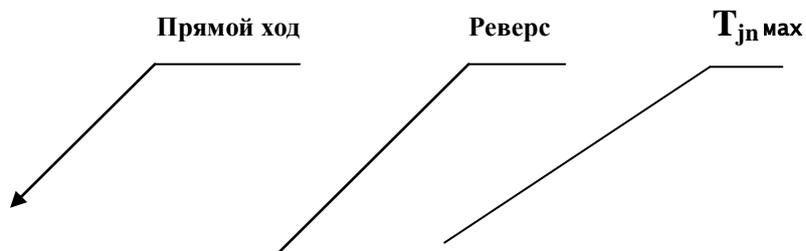
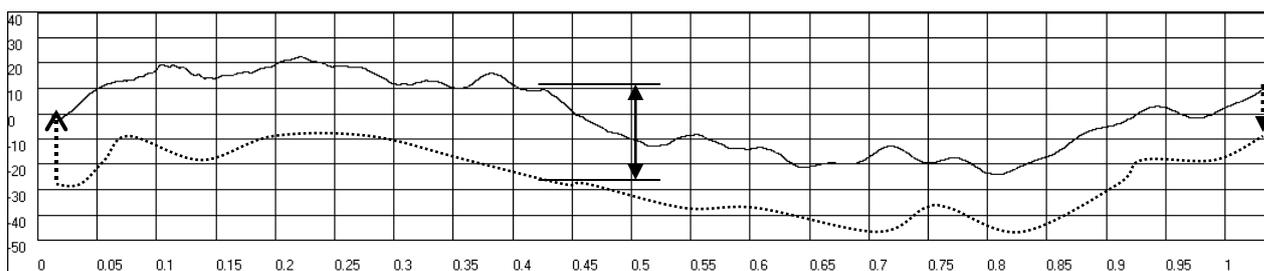


Рис. п.1.4. График временной функции циклической погрешности механизма



Погрешность, угл. сек



Угол поворота выходного механизма вала в долях оборота

Рис. п.1.5. Совмещённый график временной функции накопленной погрешности механизма при прямом ходе и реверсе.



Рис. п.1.6. Спектр кинематической погрешности механизма

Как видно из графика, представленного на рис. п.1.2, кинематическая погрешность механизма является сложной функцией, возникающей в результате суммирования погрешностей отдельных пар и звеньев, входящих в состав его кинематической цепи.

Отдельные составляющие кинематической погрешности могут быть выделены из графика путём фильтрации и/или спектрального (гармонического) анализа.

В общем случае на графике кинематической погрешности выделяют низкочастотную составляющую (см. рис. п.1.3), которая обычно называется накопленной погрешностью механизма F_p , и высокочастотную составляющую (см. рис. п.1.4), которую принято называть циклической (или периодической) погрешностью $f_{иг}$. *)

*) Примечание: В связи с тем, что технические термины и определения, обычно применяемые при контроле кинематической точности сложных машин (например, станков, и редукторов) и контроле относительно простых кинематических звеньев (например, зубчатых или винтовых передач), имеют некоторые не очень принципиальные отличия можно рекомендовать:

а) Для зубчатых колёс и передач использовать термины и определения, рекомендованные в ГОСТ 1643-81.

б) Для зубофрезерных и зубодолбежных станков использовать терминологию и определения, которые даны соответственно в ГОСТ 659-89 и ГОСТ 658-89.

с) Желаящим получить более подробную информацию, связанную с терминологией, определениями и обозначениями, а также со структурой составляющих кинематической

погрешности механизмов, можно рекомендовать обратиться к работам [10], [16], [19], на которые даны ссылки в основном тексте статьи.

Из графика, представленного на рис. п.1.3, видно, что величина накопленной погрешности F_p , равна алгебраической разности наибольшего и наименьшего мгновенных значений низкочастотной составляющей, определённой на периоде соответствующем 1-му обороту выходного вала контролируемого механизма.

Высокочастотная (циклическая) составляющая кинематической погрешности, представленная на рис. п.1.4, имеет ярко выраженный циклический характер изменения.

В данном конкретном случае указанная погрешность представляет собой синусоиду, повторяющуюся 120 раз за один оборот выходного вала, что соответствует зубцовой частоте проверенного червячного редуктора.**)

**) Примечание: В общем случае циклическая погрешность сложного механизма, состоящего из нескольких кинематических звеньев, может иметь целый ряд гармонических и негармонических составляющих, связанных как с дефектами изготовления и монтажа, так и с износом этих звеньев в процессе эксплуатации.

Величина циклической погрешности механизма f_{ir} может быть в первом приближении определена по формуле п.1.4 как среднее значение двойной амплитуды, взятое на графике циклической погрешности для всех K волн синусоиды на периоде равном 1 обороту выходного вала контролируемого механизма.

$$f_{ir} = \sum_{1}^{K} f_{irk} / N \quad (\text{п.1.4})$$

где f_{ir} - среднее значение циклической погрешности механизма, определённое на выбранном периоде измерения (например, на 1-м обороте выходного вала механизма);

f_{irk} - двойная амплитуда колебаний, измеренная на K -ом периоде повторения циклической погрешности;

k – номер соответствующей волны (от 1 до N) на графике циклической погрешности;

N - число волн циклической погрешности, выявленных на выбранном периоде измерения.

На графике временной функции циклической погрешности (см. рис. п.1.4) также может быть выделена местная циклическая погрешность f_{ir}' , которая обычно связана с локальным (местным) повреждением одного из звеньев механизма и чаще всего имеет аperiодический характер изменения.

Величина местной циклической погрешности определяется как максимальная разность между соседними экстремальными значениями (наибольшим и наименьшим) кинематической погрешности, выявленная в пределах выбранного периода измерения.

Указанная величина может значительно превышать среднее значение циклической погрешности f_{ir} .

В ряде случаев, например для кинематических редукторов, возникает необходимость измерения кинематической погрешности при прямом ходе и реверсе. При этом появляется возможность, помимо рассмотренных выше погрешностей, определять величину мёртвого хода механизма T_{jn} .

Совмещённый график накопленной погрешности механизма, полученный при прямом ходе и реверсе и обычно используемый для оценки мёртвого хода, представлен на рис. п.1.5.

Из графика видно, что мгновенное значение мёртвого хода определяется как разность мгновенных значений накопленных (или кинематических погрешностей), измеренных при прямом ходе и реверсе в одном и том же угловом положении выходного вала контролируемого механизма.

На этом графике могут быть определены как текущие, так и максимальные величины мёртвого хода для всего выбранного периода измерений.

Следует отметить, что величина мёртвого хода механизма может меняться в процессе его эксплуатации (или ресурсных испытаний) вследствие износа его звеньев. Поэтому данные об изменении мёртвого хода являются эффективным диагностическим признаком, используемым при определении величин указанного дефекта.

Помимо приведённых выше примеров представления кинематической погрешности в виде временной функции она может быть также рассмотрена в виде спектра.

Вопросы представления кинематической погрешности механизма в виде спектрального ряда гармонических составляющих достаточно подробно рассмотрены в работах [12], [16], [19].

Пример графика спектра кинематической погрешности, упомянутого выше червячного редуктора, представлен на рис. п.1.6.

По оси абсцисс на этом графике откладывается номер гармоники, соответственно равный частоте повторения того или иного дефекта механизма на периоде равном 1-му обороту его выходного вала.

По оси ординат откладываются двойные амплитуды погрешности, проявляющейся на соответствующей частоте (гармонике).

Как видно из данного рисунка, в спектре кинематической механизма присутствует 1-я гармоника, в значительной степени определяющая накопленную погрешность механизма.

Кроме неё в спектре также присутствует, упомянутая выше, 120-я гармоника, являющаяся основной составляющей циклической погрешности и связанная с зубцовой частотой червячной передачи.

В рассмотренном спектре также присутствует еще ряд других гармоник, например 6-я, 12-я, 18-я и 240-я, которые также могут рассматриваться как диагностические признаки тех или иных дефектов контролируемого механизма.

Более подробная информация о технологии проверки кинематической точности видов машин и механизмов и интерпретации результатов измерений приведена в других приложениях к данной работе (см. приложения 2 – 7), а также в литературных источниках, на которые даны ссылки в основном тексте статьи.

Приложение 2

Типовые дефекты звеньев кинематических цепей зубообрабатывающих станков. Их графическое представление. Способы и возможности снижения

негативных последствий этих дефектов.

Как уже отмечалось выше в основном тексте статьи, в 70-е годы прошлого века специалистами нашего предприятия был выполнен большой объем практических работ по контролю кинематической точности зубообрабатывающего оборудования.

Это позволило сформировать «банк данных», содержащий информацию о видах и характере проявления типовых дефектов зубообрабатывающих станков, который наш взгляд может представлять определённый интерес и для современных исследователей.

Следует особо отметить, что на момент выполнения данных работ у наших специалистов отсутствовали возможности анализа составляющих кинематической погрешности в спектральной области (не было необходимых низкочастотных анализаторов спектра). Поэтому в предлагаемых читателю материалах, взятых из Научно-технического отчёта по комплексному контролю кинематической точности зубофрезерных станков диаметром стола свыше 500 [20], рассматриваются примеры представления типовых дефектов кинематических цепей только в виде временных функций.

Анализ большого количества протоколов проверки кинематической точности зубофрезерных станков позволил определить ряд диагностические признаков, помощью которых можно идентифицировать дефекты тех или иных звеньев на графиках кинематической погрешности (кинематограммах).

В перечень основных дефектов, оказывающих наибольшее влияние на кинематическую точность зубофрезерного станка, входят:

- кинематический и геометрический эксцентриситеты червячного делительного колеса, являющийся следствием погрешности изготовления, монтажа и неравномерного износа;
- местные дефекты червячного делительного колеса, связанные с аварийными повреждениями одного или нескольких его зубьев в процессе эксплуатации;
- местные дефекты червячного делительного колеса, связанные с технологической наследственностью, вызванной местными повреждениями зубьев делительного колеса мастер-станка, на котором это колесо нарезалось;
- торцевое биение червячного делительного колеса;
- плавание стола станка, связанное износом направляющих;
- износ, повреждение, некачественная сборка и регулировка упорных подшипников делительного червяка;
- перекося оси вращения червяка или её смещение относительно средней плоскости (плоскости зацепления) червячного делительного колеса;
- износ, повреждение, некачественная сборка и регулировка подшипников инструментального шпинделя;
- износ, эксцентриситет, перекося пальца гитары деления;
- износ посадочных мест и повреждение зубьев сменных колёс гитары деления;
- износ зубчатых колёс и подшипников промежуточных валов уцепи обката-деления.

С учётом данного перечня ниже рассмотрены наиболее типичные графики кинематической погрешности, характеризующие те или иные дефекты звеньев цепи обката-деления зубофрезерных станков. Все указанные графики получены при

проведении проверок реального оборудования, эксплуатировавшегося на предприятиях Минсудпрома в начале 70-х годов прошлого века.

1. Повышенная накопленная погрешность червячного делительного колеса.

На рис. п.2.1 представлен типичный график накопленной погрешности зубофрезерного станка (в данном конкретном случае станка мод. FO 10 с диаметром обработки до 1000 мм).

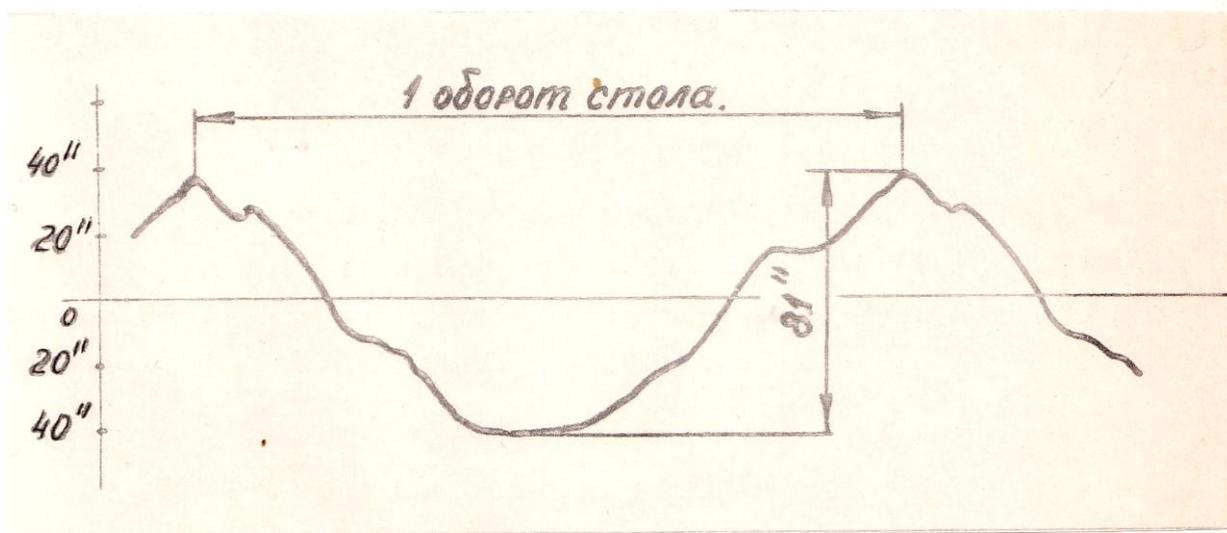


Рис. п.2.1. График накопленной погрешности зубофрезерного станка мод. FO 10.

Представленный график имеет форму близкую к синусоидальной с периодом изменения соответствующим 1 полному циклу за оборот стола.

Как видно из графика, выявленная в процессе проверки накопленная погрешность станка составляет 81 угловую секунду. Это более чем в 3 раза превышает допустимое значение по ГОСТ 659-67 для станков с диаметром обработки до 1000 мм, кинематическая точность которых по паспорту должна удовлетворять требованиям класса точности «П». Допуск на величину накопленной погрешности при этом не должен превышать 25 угловых секунд.

Подобный дефект обычно объясняется наличием кинематического и/или геометрического эксцентриситетов делительного колеса, причинами которых в общем случае могут являться:

- погрешности изготовления делительного колеса, связанные либо с повышенной накопленной погрешностью матер-станка, на котором изготавливалось данное делительное колесо, либо с погрешностью выставки заготовки данного колеса на столе мастер-станка перед обработкой;
- погрешности монтажа делительного колеса в станке (радиальное и/или торцовое биение делительного колеса относительно оси вращения стола);
- неравномерный износ делительного колеса в процессе эксплуатации;
- смещение геометрической оси делительного колеса относительно оси вращения стола вследствие аварии (ударного задевания инструментальным суппортом о стол станка, заклинивания червячной передачи станка и т.п.).

Проведённые по результатам проверки анализ эксплуатационной истории станка мод. FO 10, визуальный осмотр стола, суппорта и оснастки станка на предмет наличия повреждений, а также дополнительные измерения радиального и торцового биения зубчатого венца делительного колеса позволили диагностировать истинную причину неудовлетворительной точности.

Как выяснилось в процессе расследования, при эксплуатации станка в ночную смену имело место задевание суппорта о стол станка, что могло привести к появлению дополнительного радиального смещения (эксцентриситета) червячного делительного колеса относительно оси вращения стола.

Измерение радиального биения колеса по контрольному буртику, выполненное с помощью стрелочного индикатора показало, что оно равно 0.16 мм и более чем в 16 раз превышает допустимый уровень [19, стр.141].

Указанное радиальное биение червячного колеса (или так называемый геометрический эксцентриситет) непосредственно влияет на общую величину накопленной его погрешности станка.

Величина накопленной погрешности станка ΔF_{nr} , связанная с радиальным биением ΔR червячного делительного колеса может быть вычислена по формуле п.2.1:

$$\Delta F_{nr} = \Delta R * 412 / D_k = 160 * 412 / 864 = 76 \text{ угл. сек.} \quad (\text{п.2.1})$$

где ΔF_{nr} – доля накопленной погрешности станка от радиального биения червячного делительного колеса, угл. сек.

$\Delta R = 0.160$ мм – радиальное биение червячного колеса;

$D_k = 864$ мм – делительный диаметр червячного колеса станка FO 10.

Данные расчёта, проведённого по формуле п.2.1 подтверждают справедливость сделанного выше предположения о том, что причиной роста накопленной погрешности станка мод. FO 10 (с паспортных 25 угл.сек. до недопустимых 81 угл.сек.) явилось аварийное увеличение радиального биения червячного делительного колеса.

В принципе дефекты, связанные с геометрическим эксцентриситетом червячного зубчатого колеса, полностью устранимы и могут быть компенсированы соответствующим смещением делительного колеса в противофазе к вектору его радиального биения.

Следует также отметить, что повышенный уровень накопленной погрешности станка может быть связан не только с геометрическим, но и с кинематическим эксцентриситетом червячного колеса.

Компенсация кинематического эксцентриситета также может выполняться путём направленного радиального смещения червячного колеса относительно оси вращения. Однако данная процедура, как показано в работах [10], [14], [19], позволяет компенсировать кинематический эксцентриситет только частично.

Это объясняется тем, что фазы графиков функции радиального биения червячного колеса при различных направлениях его вращения сдвинуты друг относительно друга на угол $\pi - 2\alpha$, что в лучшем случае позволяет компенсировать кинематический эксцентриситет не более чем на 70%.

2. Местные дефекты и повреждения зубьев делительного колеса.

В зависимости от причин и характера повреждений местные дефекты делительного колеса могут проявляться на графиках кинематической погрешности либо как единичные «выбросы», либо как «выбросы», имеющие периодический характер.

На рис. п.2.2 представлен график накопленной погрешности зубофрезерного станка мод. ZWF-15, на котором отчётливо наблюдаются восемь волн, периодически повторяющихся за один оборот стола.

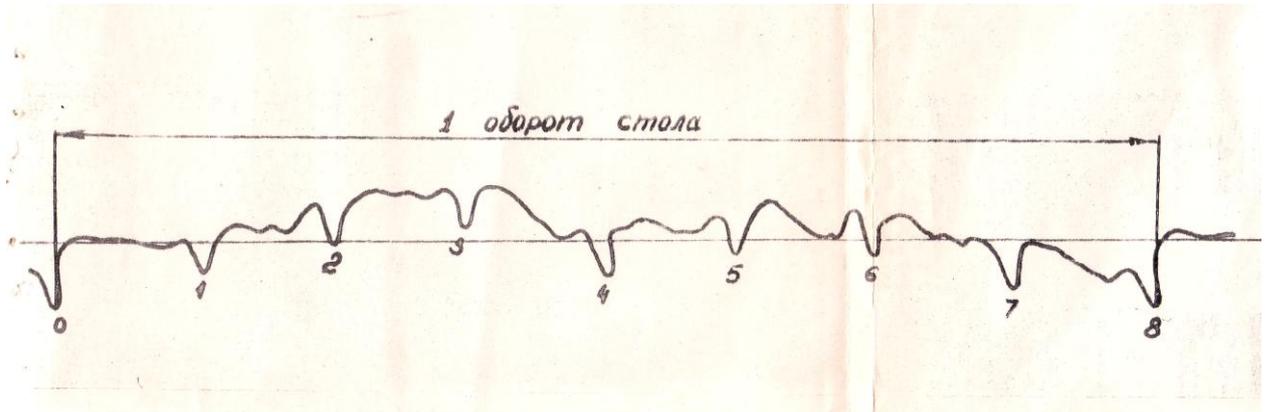


Рис. п.2.2. График накопленной погрешности станка мод. ZWF-15 с восьмью периодически повторяющимися повреждениями зубьев червячного колеса.

Причина их появления объясняется довольно просто. При работе станка не сработал концевой выключатель, ограничивающий вертикальное перемещение инструментального суппорта. В результате суппорт начал задевать о стол станка, последовательно ударяя по каждому из 8-ми пазов стола. Следствием этих ударов явились повреждения (сколы) пазов стола, а также нижней части инструментального суппорта, что и было выявлено после их визуального осмотра. Кроме того, были повреждены (сильно деформированы) зубья червячного колеса, находившиеся в момент ударов в зацеплении с червяком, о чём свидетельствует график, приведённый на рис. п.2.2.

Подобные низкочастотные периодические погрешности червячного колеса станка очень неприятны, так как в процессе обработки они практически полностью переносятся (копируются) на нарезаемое изделие.

Зубчатые колеса, имеющие подобные дефекты, работают с периодическими ударами, а их нагрузочная способность и ресурс обычно сильно ограничены.

На рис. п.2.3 приведен график кинематической погрешности станка мод. МТ-15, на котором также наблюдаются следы аварийного повреждения зубьев червячного делительного колеса станка.

Данная авария была связана с врезанием червячной фрезы в оправку, с помощью которой нарезаемое колесо было установлено на столе станка.

В отличие от предыдущего случая указанное повреждение носит не циклический, а локальный характер. Из кинематограммы (рис. п.2.3) видно, что в результате аварии было повреждено две группы зубьев (по 3-4 зуба в каждой группе).

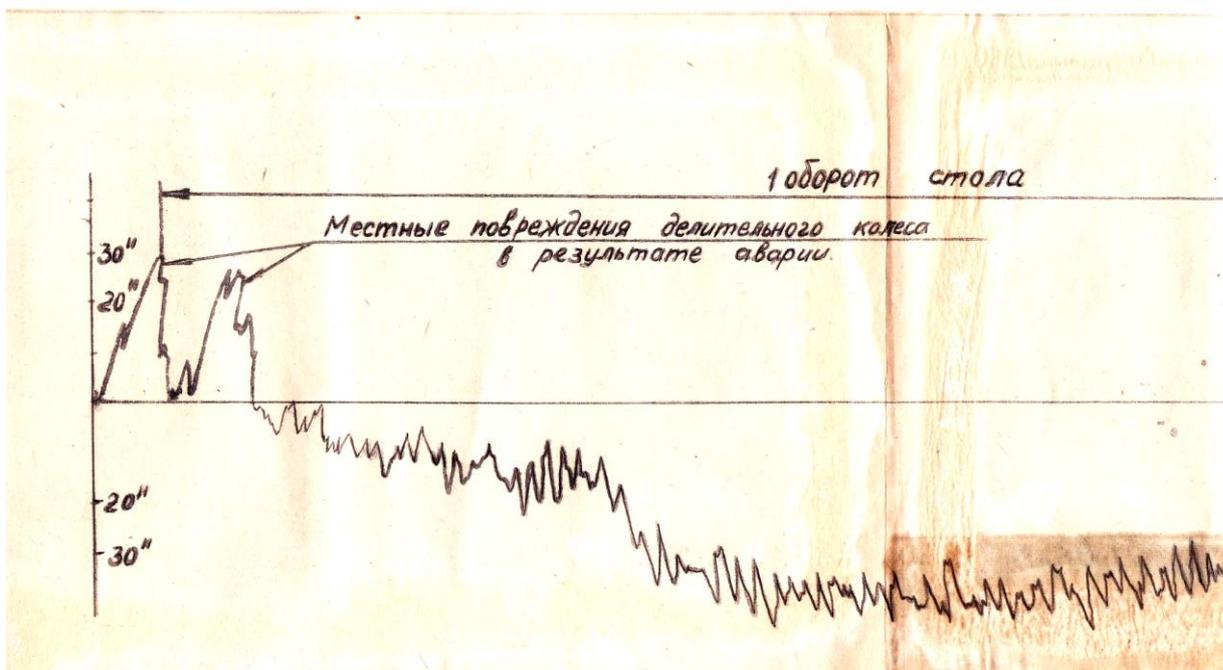


Рис. п.2.3. График кинематической погрешности станка мод. МТ-15 с локальным повреждением группы зубьев червячного колеса.

Как и в предыдущем случае, указанные местные погрешности делительного колеса станка будут практически полностью переноситься на нарезаемое колесо со всеми вытекающими из этого негативными эксплуатационными последствиями.

Следует отметить, что восстановление точностных характеристик станков после подобных аварий, характеризующихся значительными необратимыми деформациями зубчатого венца делительного колеса, является трудоёмким и дорогостоящим делом.

При необходимости данная задача может решаться либо путём замены повреждённого червячного делительного колеса новым, либо путём установки на станке коррекционного устройства, позволяющего компенсировать данные дефекты при соответствующем профилировании кулачков [12], [16].

Однако существуют случаи, когда местные дефекты зубьев червячного колеса удаётся устранить путём относительно несложных ремонтных операций с использованием кинематомера.

Один из примеров, иллюстрирующих возможности кинематометрии при устранении подобных дефектов, представлен на рис. п.2.4.

При проведении профилактического ремонта станка RS-2 в результате небрежности, допущенной слесарем-ремонтником при монтаже червяка оказались повреждёнными два зуба червячного делительного колеса.

Указанный дефект был выявлен в результате проведённой после ремонта проверки кинематической точности станка (рис. п.2.4.а).

По кинематограмме было установлено конкретное место расположения повреждённой пары зубьев на делительном колесе. После чего был обеспечен доступ в зону расположения дефектных зубьев через смотровое окно стола станка.

Проведённый осмотр показал наличие забоин на головках зубьев делительного колеса, возникших при монтаже червяка после ремонта.



Рис. п.2.4. График кинематической погрешности станка мод. RS 2
 а) с забоинами на двух зубьях червячного колеса.
 б) поле пришабривания забитых зубьев с использованием кинематомера.

После шабровки дефектных зубьев была проведена повторная проверка кинематической точности станка, подтвердившая эффективность проведённой работы.

Как видно из графика, приведенного на рис. п.2.4.б, наблюдавшийся ранее выброс полностью исчез.

Подобные работы, позволявшие с минимальными затратами устранять выявленные в процессе проверок дефекты (забоины и другие местные повреждения) зубьев делительных колёс зубообрабатывающих станков, проводились нашими специалистами многократно и в конце концов превратились в рутинную технологическую операцию.

Особый эффект эти работы имели для предприятий турборедукторного производства, таких как Калужский турбинный завод, Южный турбинный завод, Пролетарский завод, Невский завод и т.п., на которых производились зубчатые передачи 3-й – 4-й степеней точности.

3. «Плавание стола» станка.

«Плавание стола» станка (непостоянство положения оси вращения стола от оборота к обороту) связано с наличием повышенных зазоров в радиальных направляющих стола, которые обычно возникают вследствие их износа.

На рис. п.2.5 представлен график накопленной погрешности станка мод. 5E32, у которого был выявлен подобный дефект.

Характерным признаком «плавания стола» является непостоянство формы графика и величины накопленной погрешности от оборота к обороту. При этом период повторения графика накопленной погрешности может быть равен двум, трём и более оборотам стола.

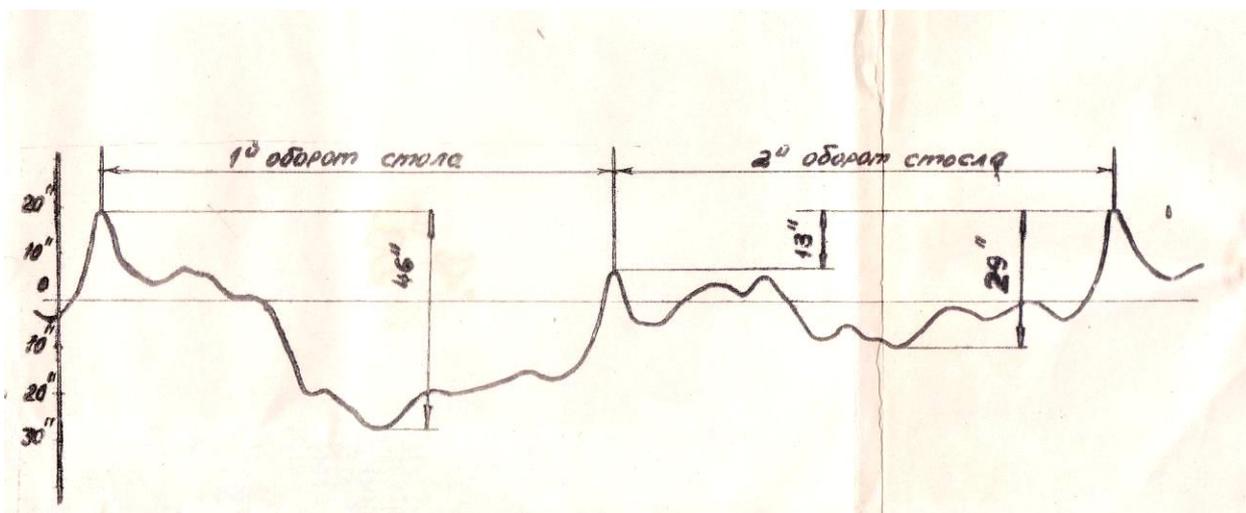


Рис. п.2.5. График накопленной погрешности станка мод. 5E32, на котором наблюдается «плавание стола» от оборота к обороту.

Указанный дефект может быть устранён силами ремонтных служб предприятия путем регулировки зазоров в радиальных подшипниках стола (в случае его конструкции с использованием подшипников качения), или путём пришабривания плоских опорных направляющих стола, обеспечивающей более плотную посадку стола в конических направляющих станины (в случае конструкции с использованием подшипника скольжения).

4. Торцовое биение зубчатого венца червячного делительного колеса.

Торцовое биение зубчатого венца червячного колеса может быть связано либо с погрешностями изготовления и сборки станка, либо с неравномерным износом кольцевых (опорных) направляющих стола станка, что обычно более вероятно.

Указанный дефект приводит к тому, что при вращении стола станка плоскость контакта червяка и червячного колеса изменяет свое положение относительно средней плоскости колеса с периодом равным одному обороту стола.

Это в свою очередь приводит к периодическому изменению амплитуды (амплитудной модуляции с частотой вращения стола) циклической погрешности зубцовой частоты, возникающей при работе червячной передачи.

На рис. п.2.6 представлен график кинематической погрешности станка мод.FO-6, искусственно ограниченный сверху и снизу низкочастотными огибающими, на котором наблюдаются два горба и две талии, свидетельствующие о наличии торцевого биения червячного относительно оси вращения стола.

Следует отметить, что при торцовом биении червячного колеса возможны частные случаи, когда на графике кинематической погрешности будет иметься только один горб и одна талия. Это указывает на то, что плоскость контакта червяка и делительного колеса имеет дополнительное постоянное смещение относительно средней плоскости колеса.

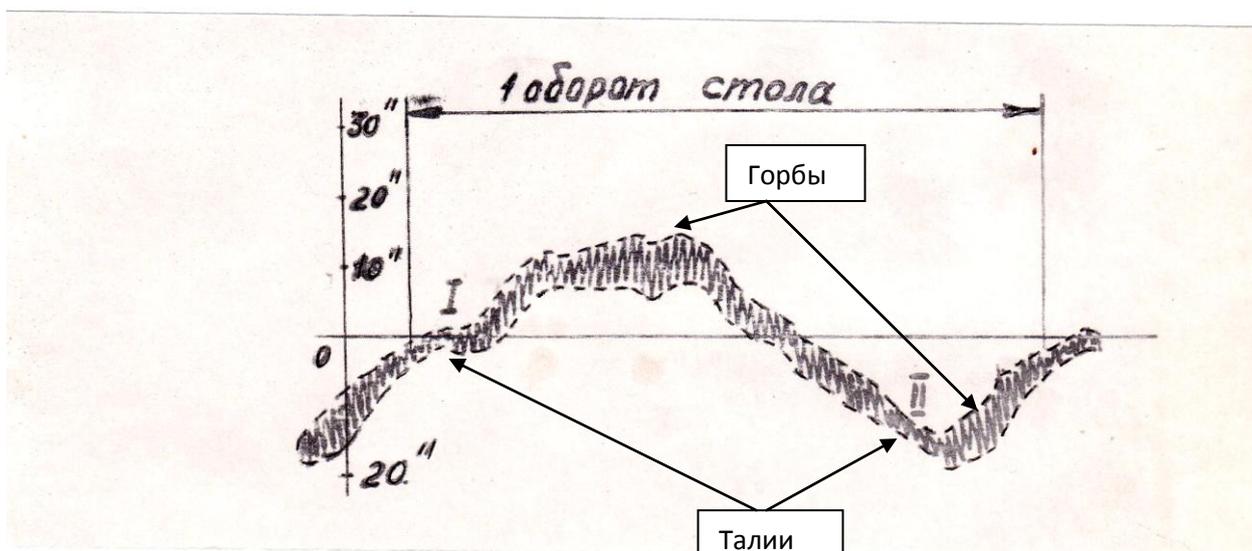


Рис. п.2.6. График кинематической погрешности станка мод. FO-6 с ярко выраженными признаками торцового биения червячного колеса.

Как и в предыдущем случае, подобные дефекты могут быть устранены путём проведения относительно несложных ремонтно-регулирующих операций, посредством которых восстанавливается перпендикулярность оси червячного колеса торцовым направляющим стола. Обычно такая работа может быть выполнена ремонтными службами предприятия во время проведения текущих или средних ремонтов оборудования.

5. Циклическая погрешность червячной делительной передачи, вызванная биением червяка в собственных подшипниках и погрешностями относительно положения червяка и делительного колеса.

Практические результаты, накопленные при проведении многочисленных проверок кинематической точности станков, а также данные работ [10], [16], [18] показывают, что циклическая погрешность червячной делительной передачи зубообрабатывающих станков в основном вызывается следующими основными причинами:

- погрешностями профиля и окружного шага червячного колеса;
- погрешностями изготовления червяка;
- погрешностями относительного положения червяка и делительного колеса;
- осевым и радиальным биением червяка в собственных подшипниках.

Все отмеченные выше дефекты имеют одни и те же графические признаки, проявляющиеся на диаграмме кинематической погрешности в виде синусоидальной составляющей с числом волн равным числу оборотов червяка за оборот стола (или что одно и то же – числу зубьев делительного колеса при однозаходном червяке).

Поэтому дифференциация именно этих дефектов представляется довольно сложным делом, требующим использования ряда дополнительных признаков и проверок.

В этой связи следует отметить, что на практике наиболее распространенным из этого класса дефектов является осевое биение червяка, которое возникает в результате износа, повреждений или некачественной регулировки его упорных подшипников.

Опыт обследования большого количества зубообрабатывающих станков показал, что степень развития указанного дефекта в значительной степени определяет точностные возможности оборудования.

На рис.п.2.7.а. представлен график кинематической погрешности станка мод. 5Е32. Как видно из графика, основная циклическая погрешность проявляется на частоте вращения червяка (96 циклов за оборот стола). Величина указанной погрешности достигает 50 угловых секунд, что более чем в 3 раза превышает допуск на циклическую погрешность по ГОСТ 659-67, установленную для станков нормального класса точности с диаметром обработки до 800 мм.

Для уточнения причины появления указанной погрешности дополнительно с помощью стрелочного индикатора была проведена проверка осевого и радиального биений червяка. Проверка показала, что осевое биение червяка составило 0.082 мм. Тогда как допустимое для данного станка значение не должно превышать 0.010 мм.

Как показал визуальный осмотр данного узла, повышенное осевое биение червяка в основном было связано с увеличением зазоров в его упорных подшипниках.

При этом сами упорные подшипники находились в удовлетворительном состоянии.

По совокупности всей собранной диагностической информации было принято решение о проведении регулировки зазоров в упорных подшипниках червяка, которая и была проведена с использованием кинематомера КН-6.

Как видно из графика кинематической погрешности (рис. п.2.7.б), после проведения регулировки величина циклической погрешности станка была снижена до 10 угловых секунд, что удовлетворяло требованиям, предъявляемым к станкам повышенного класса точности по ГОСТ 659-67.

Завершая рассмотрение данного примера, следует ещё раз повторить, что регулировка зазоров в подшипниках делительного червяка (как и в подшипниках инструментального шпинделя, о чем мы будем говорить ниже) является обязательной ремонтно-профилактической операцией, обеспечивающей поддержание на паспортном уровне точности зубообрабатывающих станков в процессе их эксплуатации.

При этом, как показал наш многолетний опыт централизованного обслуживания зубообрабатывающего оборудования на предприятиях Минсудпрома СССР, эффективность данной работы значительно повышается в случае её совмещения проверкой кинематической точности станка.

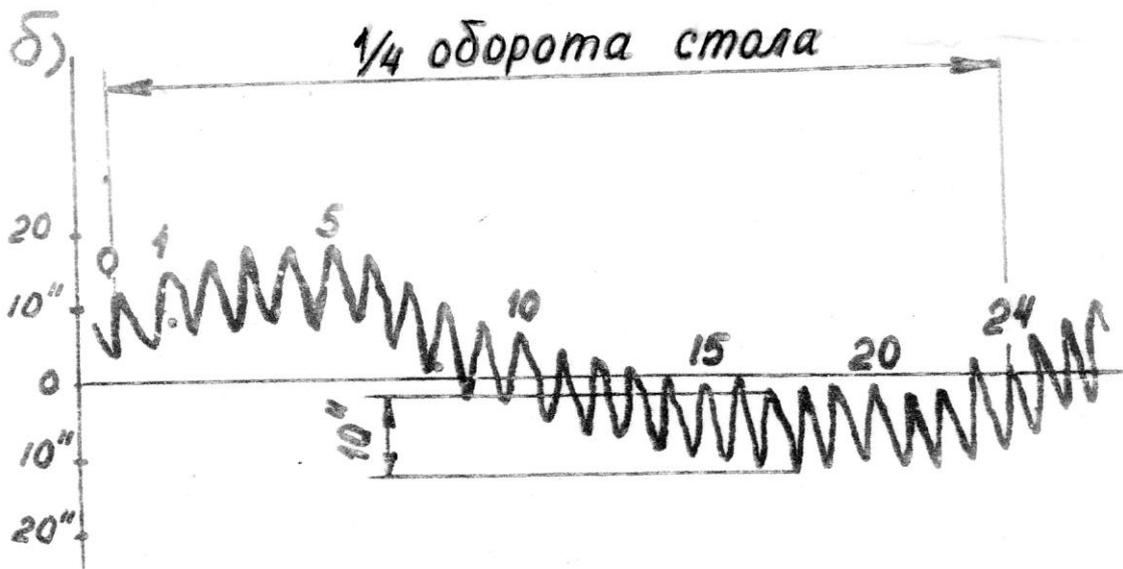
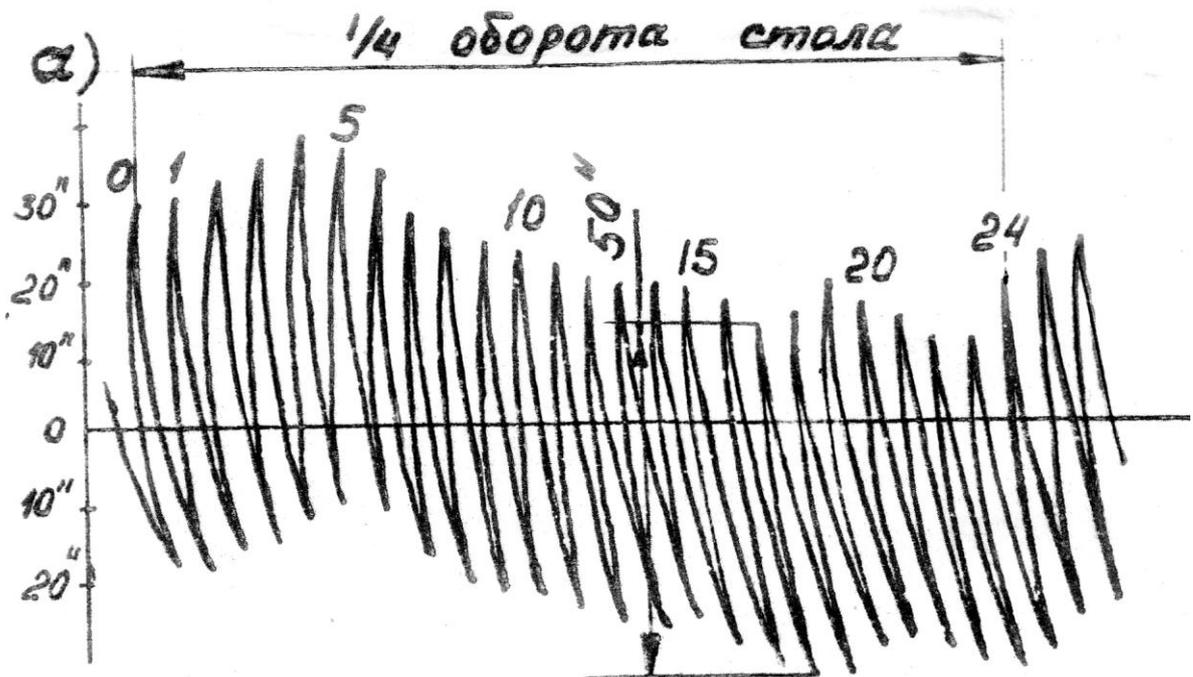


Рис.п.2.7. График кинематической погрешности станка мод. 5Е32.

а) в исходном состоянии;

б) после регулировки зазоров в подшипниках червяка.

Использование кинематомеров позволяет также выявлять без разборки дефекты зубообрабатывающих станков, связанные с погрешностью установки червяка относительно средней плоскости делительного колеса.

Особенности влияния погрешностей «позиционирования» червяка относительно делительного колеса на точность зубообрабатывающего станка подробно рассмотрены в ряде работ, в том числе в работах [10], [16], [18].

Указанные дефекты проявляются на графиках кинематической погрешности также в виде синусоидальной составляющей с числом волн, равным числу оборотов червяка за один оборот стола станка.

В общем случае неточность положения червяка относительно делительного колеса складывается из трёх основных ошибок:

- отклонения от номинального межосевого расстояния между червяком и колесом.
- перекоса оси червяка относительно средней плоскости делительного колеса;
- параллельного смещения плоскости зацепления червяка и колеса относительно средней плоскости червячного колеса;

Наибольшее влияние на циклическую погрешность червячной передачи оказывает перекося оси червяка относительно средней плоскости колеса.

Для выделения этого дефекта из общей группы дефектов, имеющих одинаковые частотные и графические признаки, проверка кинематической точности должна проводиться как при правом (по часовой стрелке), так и при левом (против часовой стрелки) направлениях вращения стола станка.

Характерным признаком наличия перекоса оси червяка в этом случае будет являться значительное отличие амплитуды циклической погрешности, проявляющейся на частоте вращения червяка при прямом ходе и реверсе стола.

В качестве характерного примера рассмотрим результаты контроля кинематической точности станка мод. 5Д32, графики кинематической погрешности которого, полученные при вращении стола по и против часовой стрелки, приведены на рис. п.2.8.

Как видно из графиков, величины циклической погрешности при правом и левом вращении стола равны соответственно 25 угловым секундам (рис. п.2.8.а) и 16 угловым секундам (рис. п.2.8.б).

Это (при условии качественной регулировки зазоров в подшипниках червяка) позволяет предположить, что левый и правый профили червяка контактируют с червячным колесом в разных по ширине сечениях.

Для подтверждения правильности поставленного диагноза обычно проводится дополнительная проверка червячной делительной пары станка на краску (по пятну контакта).

После чего при необходимости может быть выполнен комплекс ремонтно-регулирующих операций, обеспечивающий выставку червяка относительно червячного колеса с заданной точностью, а также последующая проверка качества сборки с использованием кинематомера.

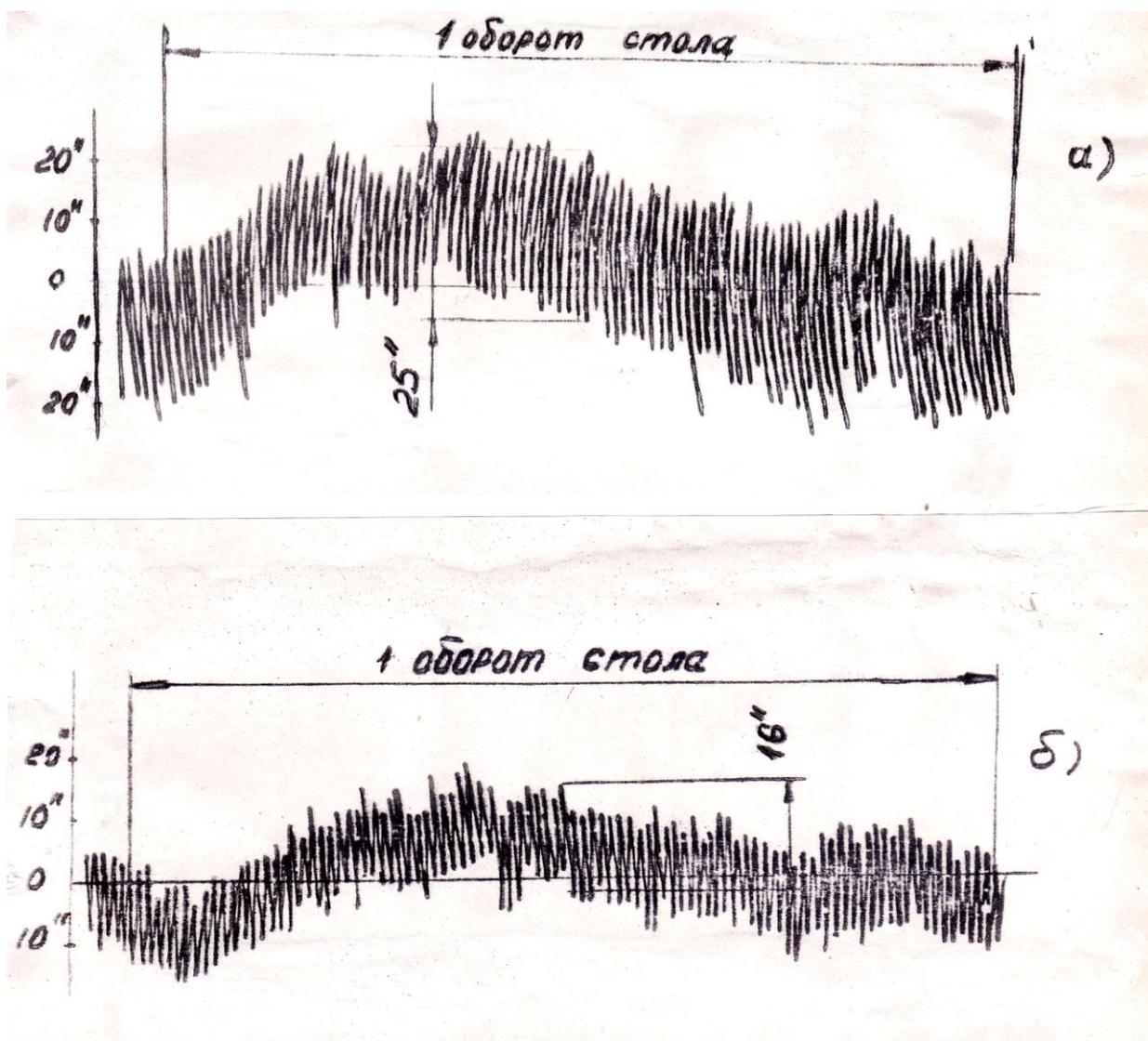


Рис. п.2.8. График кинематической погрешности станка мод. 5Д32
 а) при вращении стола по часовой стрелке;
 б) при вращении стола против часовой стрелки.

6. Циклическая погрешность, связанная с дефектами узла инструментального шпинделя.

Узел инструментального шпинделя (также как и, рассмотренный выше, подшипниковый узел делительного червяка) является одним из наиболее нагруженных звеньев кинематической цепи станка.

В процессе эксплуатации под воздействие сил резания техническое состояние этого узла может существенно ухудшаться, что соответственно приводит к появлению дополнительной составляющей циклической погрешности станка.

Погрешность шпиндельного узла проявляется на графике кинематической погрешности в виде синусоидальной составляющей с частотой равной числу оборотов фрезы (инструментального шпинделя) за один оборот стола станка.

На рис.п.2.9. представлен график кинематической погрешности зубофрезерного станка мод. 5К32А, у которого была выявлена составляющая циклической погрешности, связанная с дефектами шпиндельного узла.

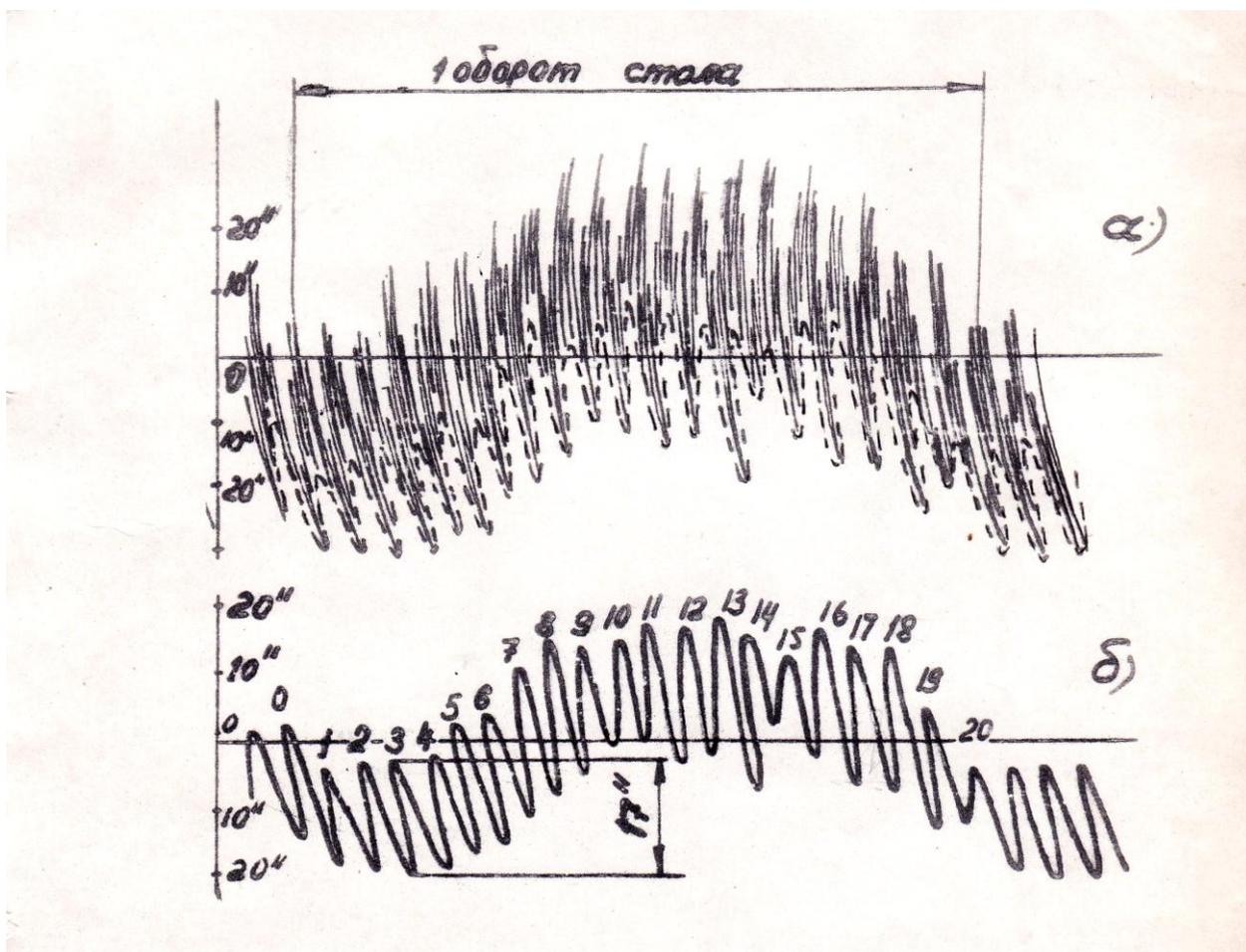


Рис. п.2.9. График кинематической погрешности станка мод. 5К32А.

- а) Общая кинематическая погрешность станка
 б) Циклическая погрешность от шпиндельного узла, выделенная методом огибающих.

При проведении данной проверки кинематическая цепь станка была настроена на нарезание зубчатого колеса с небольшим числом зубьев равным 20. Такая настройка была выбрана специально, так как она позволяет за счёт уменьшения редуцирования циклической погрешности ветви инструментального шпинделя облегчить её выделение на графике общей погрешности станка. *)

*) *Примечание:* Этот приём был особенно актуален для 60 - 80 годов прошлого века, когда расшифровка графиков кинематической погрешности проводилась в ручную и когда отсутствовала, доступная в настоящее время, возможность использования средств для спектрального анализа сложных сигналов в реальном времени.

Хотя в определённых случаях (особенно при идентификации дефектов прецизионных станков) он может быть рекомендован к применению и сегодня.

При анализе графика, представленного на рис. п.2.9.а, было установлено, что суммарная кинематическая погрешность станка представляет суперпозицию трёх основных составляющих и состоит из:

- 1-й гармоники, связанной с накопленной погрешностью червячного делительного колеса;
- 96-й гармоники, связанной с дефектами узла делительного червяка;
- 20-й гармоники, связанной с дефектами шпиндельного узла.

На рис. п.2.9.б представлен график составляющей циклической погрешности шпиндельного узла, выделенный из общего графика методом огибающей.

Следует ещё раз отметить, что возможность такого наглядного выделения этой составляющей была обеспечена настройкой кинематической цепи станка на малое число зубьев ($Z_n = 20$).

Визуальный осмотр и дополнительная инструментальная проверка радиального и осевого биений шпинделя показали, что причина появления повышенной составляющей циклической погрешности, проявляющейся на частоте его вращения, связана с повышенными зазорами в подшипниках шпинделя.

Проведённая по результатам проверки регулировка зазоров в подшипниках шпинделя позволила значительно снизить долю указанной составляющей в общей величине циклической погрешности станка.

Как уже отмечалось выше, подшипниковый узел инструментального шпинделя (наряду с узлом делительного червяка) является одним наиболее нагруженных звеньев кинематической цепи зубофрезерного станка, ускоренный износ и/или повреждение которого в значительной степени снижают его точностные возможности .

Поэтому регулировка зазоров в подшипниках инструментального шпинделя является обязательной ремонтно-профилактической операцией, которая должна периодически проводиться в процессе эксплуатации оборудования (желательно с использованием данных кинематического контроля).

7. Циклические погрешности, связанные с дефектами промежуточных звеньев кинематических цепей станков.

Дефекты промежуточных звеньев также могут вносить свой вклад в общую циклическую погрешность кинематических цепей.

Как уже отмечалось выше числу основных дефектов промежуточных звеньев можно отнести следующие:

- дефект пальца гитары деления станка;
- повреждение зубьев и износ посадочных мест сменных зубчатых колёс гитары деления;
- износ зубчатых колёс и подшипников промежуточных валов в цепи обката-деления.

В этой связи, с учётом статистики многочисленных проверок, в первую очередь следует обращать внимание на техническое состояние пальца гитары деления .

Данный узел вследствие особенностей конструкции, а также сложных условий эксплуатации, приводящих к ускоренному износу базовых посадочных поверхностей и,

установленной на пальце, промежуточной втулки, является одним из наиболее «слабых» звеньев кинематической цепи станка.

При определённом уровне развития дефектов, составляющая циклической погрешности от пальца гитары деления может быть соизмерима с составляющей циклической погрешности от делительного червяка.

В качестве примера на рис. п.2.10 приведён график кинематической погрешности станка мод.5К328А.

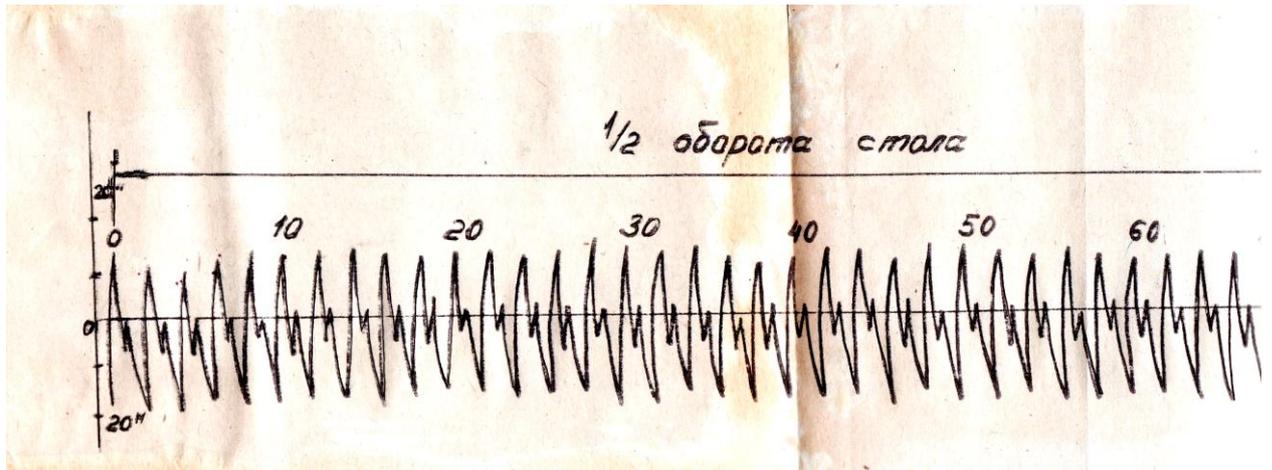


Рис. п.2.10. График кинематической погрешности станка мод. 532.

На данном графике преобладают две основных составляющих циклической погрешности станка, проявляющиеся соответственно на частоте 84 цикла за оборот стола и частоте 168 циклов за оборот стола.

Анализ кинематической схемы станка позволяет сделать вывод о том, что первая составляющая, имеющая размах 15 угловых секунд, связана с циклической погрешностью червячной делительной передачи станка (число зубьев делительного колеса станка равно 84). Вторая составляющая, также имеющая размах около 15 угловых секунд, связана с дефектом пальца гитары деления. Её частота (168 циклов за оборот стола) определяется соотношением зубчатых колёс гитары деления «d» ($Z_d = 80$) и «C» ($Z_c = 40$), связывающих вал червяка и палец гитары деления.

Для выявления и устранения рассмотренного выше дефекта обычно не требуется ни высокой квалификации персонала, ни значительных материальных затрат.

Однако, несмотря на относительную простоту реализации, данная процедура в ряде случаев может быть очень эффективной, так как позволяет существенно снизить циклическую погрешность станка.

Сказанное выше также можно отнести и к проблемам, связанным с обеспечением требований по поддержанию на заданном уровне технического состояния сменных зубчатых колёс гитары деления.

8. Спектральное представление типовых дефектов зубообрабатывающих станков.

Как уже отмечалось выше в основном тексте статьи, современные средства контроля кинематической точности в отличие от кинематометров, применявшихся в 70-е – 80-е годы прошлого века, обеспечивают возможность рассмотрения функции кинематической погрешности, как во временной, так и в спектральной областях.

Это существенно облегчает постановку диагноза, а также в ряде случаев повышает его достоверность.

Поэтому представляется целесообразным в дополнение к признакам основных дефектов кинематических цепей зубообрабатывающих станков, рассмотренным во временной области, привести также и спектральные признаки этих дефектов.

Указанные признаки представлены в таблице П.2.1

При анализе спектров гармонических составляющих кинематической точности зубообрабатывающих станков обычно принято рассматривать относительные частоты проявления погрешностей, приведённые к выходному звену (столу станка), частота которого, обозначаемая как $f_{ст.}$, принимается равной 1.

Таблица П.2.1.

Вид дефекта	Обозначение	Частота в оборотах за оборот стола
Накопленная погрешность, связанная с геометрическим или кинематическим эксцентриситетами (рис. п.2.1)	$f_{ст.}$	1
Накопленная погрешность, связанная с овальностью червячного колеса или радиального подшипника (радиальных направляющих) стола	$2 * f_{ст.}$	2
Единичное местное повреждение делительного колеса станка (рис. п.2.3)	$f_{ст.}; 2 * f_{ст.}; 3 * f_{ст.}$ и более высокие гармоники	1; 2 ; 3 и выше
Множественно (n раз за оборот) повторяющиеся повреждения делительного колеса станка (рис. п.2.2)	$f_{ст.} * n; 2 * f_{ст.} * n; 3 * f_{ст.} * n$ и более высокие гармоники	$n; 2 * n; 3 * n$ и выше
Плавание стола станка (зазоры в цилиндрических направляющих стола)	$(0.25 - 0.5) * f_{ст.}$	0.25 - 0.5
Циклическая погрешность червячной делительной передачи, где – Z число зубьев червячного делительного колеса (рис. п.2.7, п.2.8)	$f_z = f_{ст.} * Z$	Z
Торцовое биение червячного колеса (рис. п.2.5)	$f_{тб} = (f_z \pm f_{ст.}); (f_z \pm 2 * f_{ст.})$	$(Z \pm 1); (Z \pm 2)$

Таблица П.2.1
(продолжение)

Вид дефекта	Обозначение	Частота в оборотах за оборот стола
Циклическая погрешность от инструментального шпинделя (рис.п.2.9), где $i_{шп.}$ – передаточное отношение цепи деления станка от стола станка до инструментального шпинделя (настройка на число зубьев нарезаемого колеса)	$f_{шп.} = f_{ст.} * i_{шп.}$	$1 * i_{шп.}$
Циклическая погрешность от промежуточного звена цепи деления станка, где $i_{пз.}$ – передаточное отношение цепи деления станка от стола до соответствующего промежуточного звена (рис.п.2.10)	$f_{пз.} = f_{ст.} * i_{пз.}$	$1 * i_{пз.}$
Местное повреждение зубьев зубчатого колеса промежуточного звена цепи деления станка	$f_{мп} = f_{ст.} * i_{пз.};$ $2 * f_{ст.} * i_{пз.};$ $3 * f_{ст.} * i_{пз.}$ и более высокие гармоники	$1 * i_{пз.}; 2 * i_{пз.};$ $3 * i_{пз.}$ и ВЫШЕ

Приложение 3

Примеры контроля кинематической точности винтовых передач

Винтовые передачи в значительной степени определяют точность и эксплуатационную надёжность приводов линейных перемещений различного оборудования и в первую очередь металлообрабатывающих станков.

Поэтому вопросам их контроля и диагностирования должно уделяться не меньшее внимание, чем в случае рассмотренных выше зубчатых передач.

Как показывает наша практика, одним из наиболее информативных средств контроля и диагностирования винтовой передачи также является кинематометрия. Указанный метод позволяет не только оценивать точностные характеристики винтовой передачи, но и выявлять большинство её основных дефектов, возникающих на стадии изготовления, сборки и эксплуатации.

Специалистами нашего предприятия накоплен значительный опыт по контролю точности кинематических цепей с линейными перемещениями различных металлообрабатывающих станков, в том числе:

- цепей подач зубофрезерных станков;
- цепей обката зубошлифовальных станков с единичным делением;
- цепей подач токарно-винторезных и резьбошлифовальных станков;
- приводов подач рабочих органов станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

По нашему мнению определённый практический интерес для специалистов могут представлять результаты, полученные при контроле кинематической точности приводов подач рабочих органов станков с ЧПУ.

В процессе проведения указанной работы, которая в основном выполнялась в 80-е годы прошлого века, было обследовано более 45 единиц программного оборудования, что позволило разработать не имеющую аналогов технологию диагностирования механических узлов приводов по координатам станков с ЧПУ.

При проведении этих работ использовался кинематомер РЦ44 (КИ-01), дополнительно оснащённый высокоточным лазерным датчиком линейных перемещений.

На рис. п.3.1. представлена кинематическая схема привода подачи стойки станка с ЧПУ мод. ИР-800.

Как видно из рисунка, подлежащая контролю кинематическая цепь состоит из установленной в подшипниках шариковой винтовой передачи (ШВП), обеспечивающей линейное перемещение стойки станка. Винт передачи приводится во вращение с помощью электродвигателя, установленного соосно с винтом и соединённого с ним муфтой.

Представленная схема контроля кинематической погрешности винтовой передачи в принципе аналогична схеме, используемой при контроле редукторного механизма, которая приведена на рис п.1.1 в приложении 1.

При проведении проверки для измерения линейного перемещения выходного - тихоходного звена (суппортной стойки станка) использовался лазерный датчик линейных перемещений. На входном - быстроходном звене (хвостовике электродвигателя) был установлен фотоэлектрический датчик угловых перемещений, который обеспечивал измерение угла поворота винта.

Импульсные сигналы с датчиков поступали на соответствующие входы измерительного блока кинематомера РЦ44, с помощью которого измерялось рассогласование по перемещению входного и выходного звеньев контролируемой цепи и определялась величина её кинематической погрешности.

Результаты измерений в виде временной функции регистрировались на бумажный носитель с помощью самопишущего прибора Н-3021, а также записывались на измерительный магнитофон.

Магнитофонные записи использовались в стационарной системе автоматизированной обработки измерительной информации, выполненной на базе анализатора спектра СК4-72 и на ПЭВМ «Искра 226» [21]. Указанная система была создана нашими специалистами в начале 80-х годов, и предназначалась для автоматизации диагностирования машин и механизмов по спектрам кинематической погрешности и вибрации.

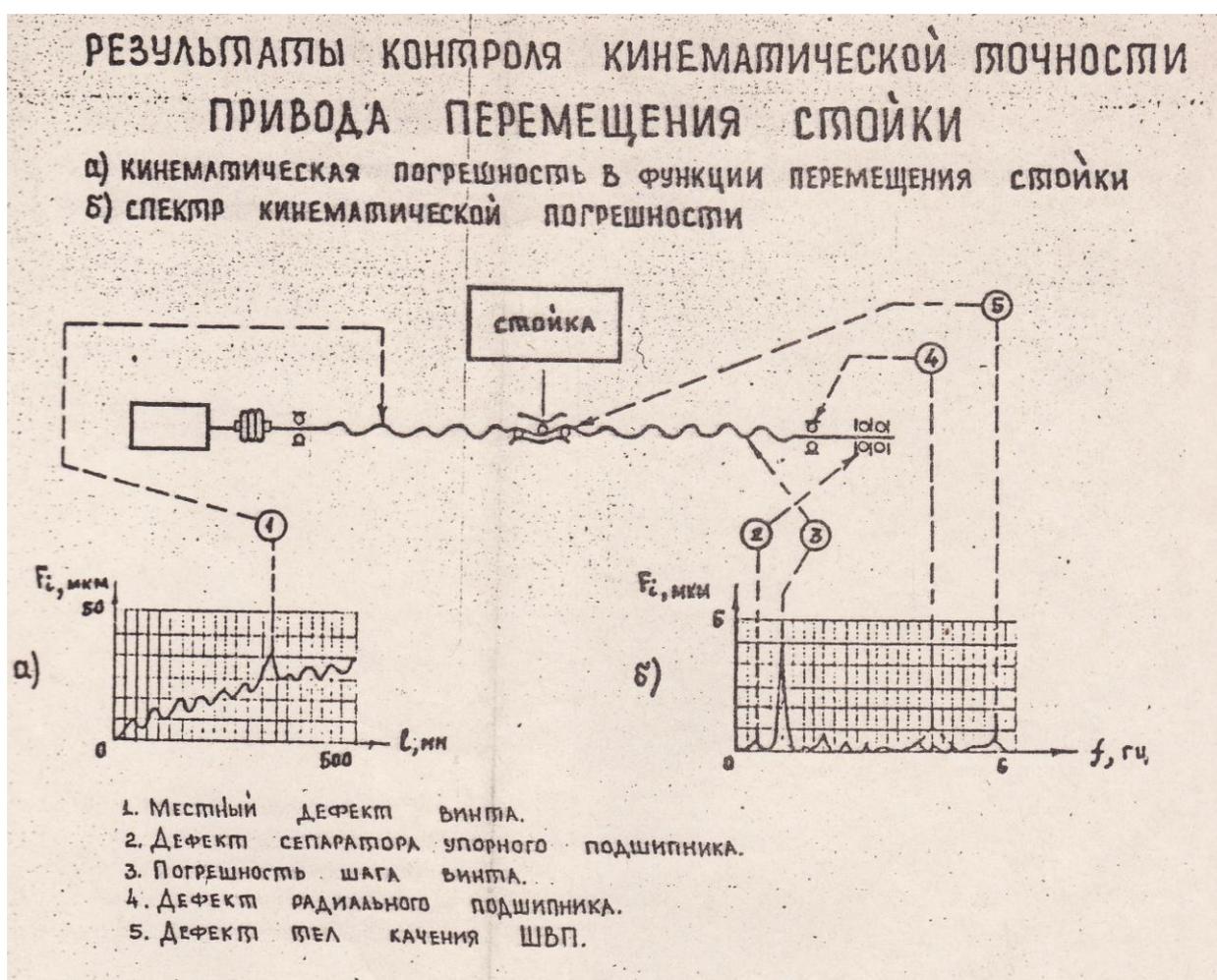


Рис. п.3.1. Типовая схема и результаты контроля кинематической точности привода рабочего органа станка с ЧПУ.

На рисунке 3.1 также изображены обобщённые (теоретические) графики временной функции (рис.3.1.а) и спектра (рис.3.1.б) кинематической погрешности винтовой передачи станка, а также представлен перечень ряда дефектов, которые могли бы быть выявлены при анализе этих графиков.

Указанные теоретические графики были получены в результате обработки и анализа большого количества реальных графиков, некоторые примеры которых представлены на рисунках п.3.2, п.3.3 и п.3.4.

На рис. 3.2 изображены график временной функции кинематической погрешности привода станка с ЧПУ мод. ИР 800 инв. № 27862, полученный при прямом ходе и реверсе его рабочего органа (суппортной стойки).

По оси абсцисс на графике отложены линейные перемещения рабочего органа, а по оси ординат – величины мгновенных значений кинематической погрешности, соответствующие той или иной величине перемещения рабочего органа.

Указанный график может рассматриваться как типичный для большинства станков данного вида.

На нём можно выделить общую кинематическую погрешность F_{ir} и её высокочастотную составляющую - циклическую f_{ir} погрешность.

При необходимости путём фильтрации из этого графика также может быть получен график накопленной погрешности привода F_p (на рис. 3.2 не показан), который представляет собой среднюю линию, проведённую на графике кинематической погрешности.

Кроме того, на данном графике может быть выявлена величина мёртвого хода T_{jn} , которая в данном случае характеризует величину зазора в ШВП.

В связи с тем, что для станков с ЧПУ (в отличие от зубообрабатывающих станков) параметры кинематической точности официально не нормируются, оценка качества их изготовления и монтажа винтовых передач приводов проводилась с использованием норм, разработанных одним из головных предприятий-изготовителей ШВП (СТП 0222337-345-85 «Детали передачи винт-гайка качения»).

В указанном документе установлены допуски на накопленную погрешность передачи F_p и её внутришаговую - циклическую погрешность f_{ir} , периодически повторяющуюся на каждом шаге (обороте) винта.

Помимо указанного документа при оценке кинематической точности приводов по координатам могут также использоваться нормы, установленные в ОСТ Н72-6-85. «Станки и гибкие производственные модули сверлильно-фрезерно-расточные. Нормы точности», регламентирующие допустимые величины погрешности позиционирования станков с ЧПУ.

Анализ графика (см. рис. 3.2) показывает, что выявленная в процессе проверки кинематическая погрешность, включает в себя две основных составляющих.

Первая (низкочастотная составляющая) представляет из себя накопленную погрешность винтовой передачи, которая как при прямом ходе, так и при реверсе равна 35 мкм.

Вторая – высокочастотная составляющая, проявляющаяся на частоте вращения винта (70 волн на пути перемещения рабочего органа, равном 700 мм, при шаге винта 10 мм), является циклической погрешностью.

Величины указанной погрешности при прямом ходе и реверсе соответственно равны 4 и 6 мкм.

Полученные результаты удовлетворяют допускам, установленным в СТП 0222337-345-85 для винтовых передач 3 класса точности, которые равны соответственно 38 мкм и 6 мкм для накопленной и внутришаговой (циклической) погрешностей.

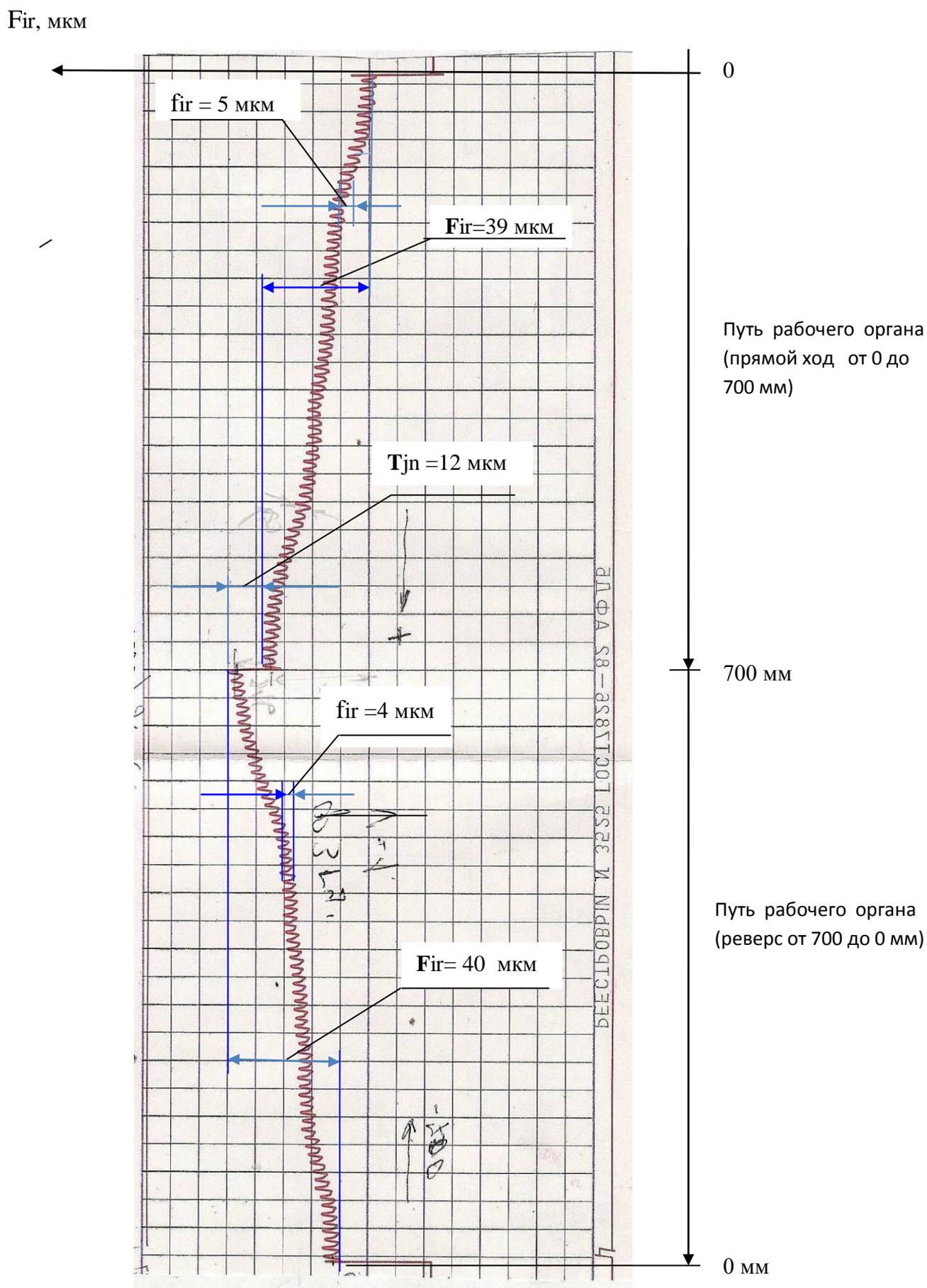


Рис. п.3.2. Графики кинематической погрешности привода перемещения стойки станка мод. ИР 800, инв. № 27862 (прямой ход и реверс).

Винтовые передачи указанного класса точности могут быть рекомендованы для использования в станках класса точности «П» (повышенной точности), к категории которых относится и проверенный станок мод. ИР 800.

В процессе проверки станка мод. ИР 800 также была определена величина мёртвого хода привода, которая, как видно из графика на рис. п.3.2, равна 12 мкм.

В связи с тем, что наличие мёртвого в винтовых передачах программных станков недопустимо, по результатам проверки было принято решение о проведении ревизии узлов, которые могли являться потенциальными источниками зазоров.

В частности ревизии были подвергнуты ШВП, её упорные подшипники и соединительная муфта.

По результатам ревизии, выявившей, что основные зазоры имеются непосредственно в ШВП, была проведена их регулировка, позволившая полностью устранить этот дефект.

На рис. п.3.3 представлен график проверки кинематической точности привода перемещения стойки аналогичного станка мод. ИР 800, инв. № 27625.

Как видно из графика, кинематическая точность привода стойки этого станка по всем параметрам значительно ниже, чем у предыдущего.

В частности, выявленные у станка с инв. № 27625 накопленные погрешности привода стойки F_r при прямом ходе и реверсе соответственно равны 65 мкм и 78 мкм, что практически в 2 раза хуже, чем у станка с инв. № 27862.

Указанные погрешности превышают допуски, установленные в СТП 0222337-345-85 для винтовых передач 4 класса, что недопустимо даже для станков нормального класса точности, не говоря уже о станках класса «П», к которым относится проверенный станок мод. ИР 800.

У этого же станка при реверсе выявлена недопустимая циклическая погрешность, проявляющаяся на частоте вращения винта и равная 13 мкм, при допуске для ШВП 3-го класса, равном 6 мкм. (Как показал последующий анализ, указанная погрешность была связана с повышенными зазорами в упорном подшипнике винтовой передачи, нагруженном при реверсивном перемещении стойки).

Мёртвый ход в винтовой паре указанного станка также достигает недопустимого уровня – 64 мкм. Для сравнения это более чем в пять раз превосходит мёртвый ход, выявленный у первого станка.

Кроме того, у второго станка имеется ярко выраженный местный дефект винта, проявляющийся при прямом ходе стойки. Указанный дефект достигает 14 мкм и связан с локальным повреждением его винтовой поверхности, которая взаимодействует с телами качения при прямом ходе стойки.

Следует также отметить, что помимо внутришаговой циклической погрешности, проявляющейся на частоте вращения винта, у станка с инв. № 27625 выявлена заметная составляющая, повторяющаяся около 10 раз за оборот винта.

Указанная составляющая наглядно видна на фрагменте растянутого графика временной функции, приведённом на рис. 3.4.

Источник этой погрешности был идентифицирован при сопоставлении фактического и расчётного спектров сигнала кинематической погрешности с использованием, автоматизированной системы анализа сигналов и постановки диагноза, о которой было сказано выше.

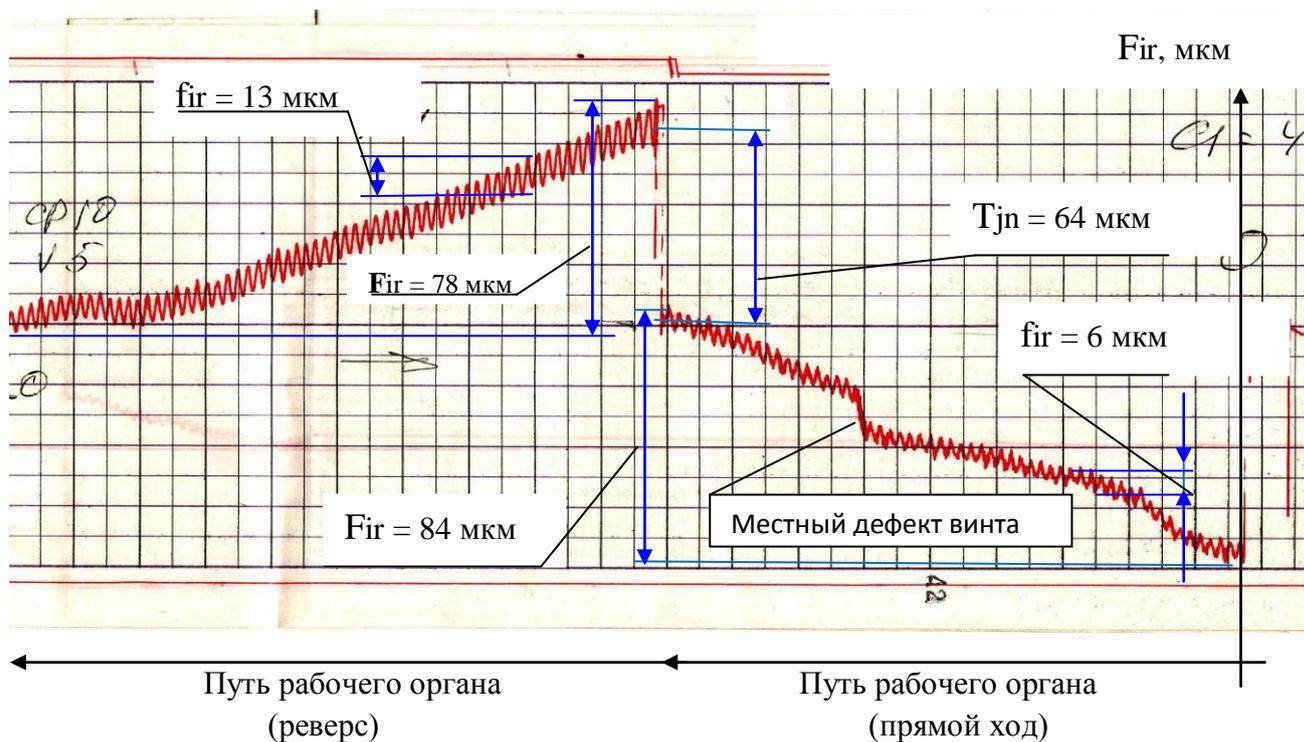


Рис. п.3.3. Графики кинематической погрешности привода перемещения стойки станка мод. ИР 800, № 27625 (прямой ход и реверс) с полосой пропускания фильтра 2 Гц.

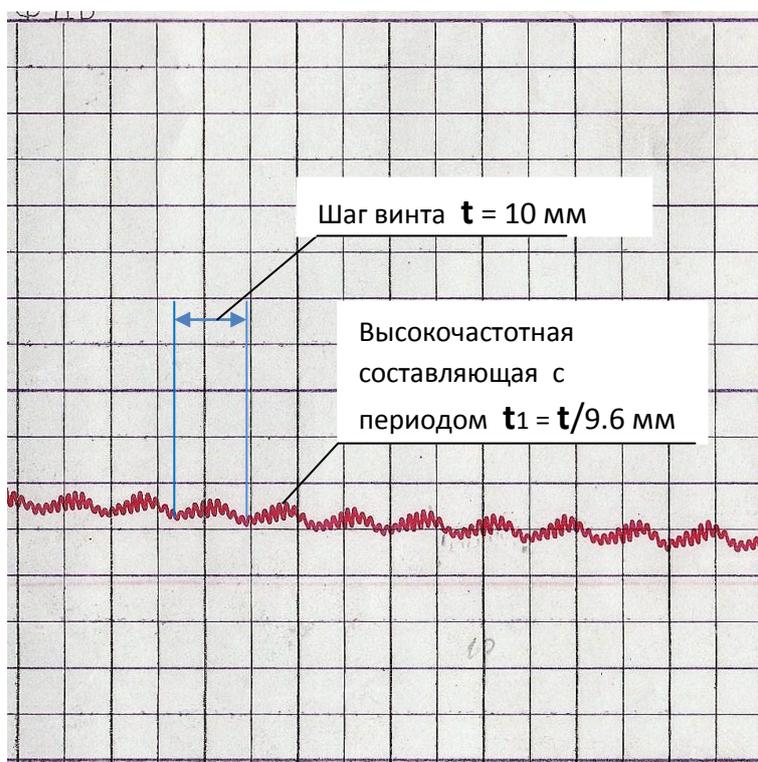


Рис. п.3.4. Фрагмент растянутого графика кинематической погрешности привода перемещения стойки станка мод. ИР 800, № 27625 (прямой ход) с полосой пропускания фильтра 10 Гц.

Как видно из диагностической таблицы (см. рис. 3.5), полученной с помощью системы для автоматизированной постановки диагноза, выявленная составляющая циклической погрешности проявляется на частоте 402 цикла в минуту и достигает 4 мкм.

СВОБОДНАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА ИР800 # 27625									
I	ЧАСТОТЫ		ПОГРЕШНОСТЬ, УГЛ. С/ММКМ		НАИМЕНОВАНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА УЗЛА	МЕСТО УСТ.	ПЕРЕЧЕНЬ ВОЗМОЖН		
	КОЛ/МИН	ЧАСТОТЫ КОЛ/МИН	ФАКТ	ДОПУСК					
*	1.00	42.0	3.00	6.515	ШВП.ВНГ. #	1	ВАЛ#	1	ЭКСЦЕНТРИС., ДИСБАЛАНС
	1.00	42.0	3.00	6.515	ПОДШИПНИК КАЧ. 80209		ВАЛ#	1	ЗАЗОР, ПЕРЕКОС
	1.00	42.0	3.00	6.515	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ЗАЗОР, ПЕРЕКОС
	1.00	42.0	3.00	6.515	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ЗАЗОР, ПЕРЕКОС
	1.00	42.0	3.00	6.515	ЭЛ.ДВИГ. #	2	ВАЛ#	1	ДИСБАЛАНС
	1.00	78.0	0.00	1.164	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ЗАЗОР, ПЕРЕКОС
	1.00	78.0	0.00	1.164	ПОДШИПНИК КАЧ. 80209		ВАЛ#	1	ЗАЗОР, ПЕРЕКОС
	1.00	78.0	0.00	1.164	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ЗАЗОР, ПЕРЕКОС
	1.00	78.0	0.00	1.164	ШВП	1	ВАЛ#	1	ПЕРЕКОС, ЭКСЦЕНТРИС.
	1.00	78.0	0.00	1.164	ЭЛ.ДВИГ. #	2	ВАЛ#	1	ПЕРЕКОС, ЭЛ. ДИСБАЛАНС
	1.00	120.0	3.00	0.254	ПОДШИПНИК КАЧ. 80209		ВАЛ#	1	ЗАЗОР, ПЕРЕКОС
	1.00	120.0	3.00	0.254	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ЗАЗОР, ПЕРЕКОС
	1.00	120.0	3.00	0.254	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ЗАЗОР, ПЕРЕКОС
	1.00	120.0	3.00	0.254	ШВП	1	ВАЛ#	1	ПЕРЕКОС, ЭКСЦЕНТРИС.
	1.00	120.0	3.00	0.254	ЭЛ.ДВИГ. #	2	ВАЛ#	1	ПЕРЕКОС
	1.00	240.0	0.73	0.473	ПОДШИПНИК КАЧ. 80209		ВАЛ#	1	ДЕФ. ВНУТР. КОЛ.
	1.00	240.0	3.42	0.473	ПОДШИПНИК КАЧ. 80209		ВАЛ#	1	ДЕФ. НАР. КОЛ.
	1.00	318.0	3.42	0.655	ПОДШИПНИК КАЧ. 80209		ВАЛ#	1	ДЕФ. НАР. КОЛ.
	1.00	402.0	0.95	4.368	ШВП	1	ВАЛ#	1	ДЕФ. ТЕЛ. КАЧ.
*	1.00	402.0	7.50	4.368	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. НАР. КОЛ.
	1.00	402.0	7.50	4.368	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. ВНУТР. КОЛ.
	1.00	438.0	10.50	2.693	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. ВНУТР. КОЛ.
	1.00	438.0	10.50	2.693	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. НАР. КОЛ.
	1.00	480.0	7.50	0.764	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. ВНУТР. КОЛ.
	1.00	480.0	7.50	0.764	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. НАР. КОЛ.
	1.00	600.0	9.62	0.327	ПОДШИПНИК КАЧ. 80209		ВАЛ#	1	ДЕФ. ТЕЛ. КАЧ.
	1.00	600.0	9.75	0.327	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. НАР. КОЛ.
	1.00	648.0	9.75	0.291	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. ВНУТР. КОЛ.
	1.00	762.0	2.13	0.509	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. ТЕЛ. КАЧ.
	1.00	840.0	7.02	1.055	ПОДШИПНИК КАЧ. 504710		ВАЛ#	1	ДЕФ. ТЕЛ. КАЧ.
		360.0		1.528					ВНИМАНИЕ! ИСТОЧНИК НЕ ИД
		522.0		0.364					ВНИМАНИЕ! ИСТОЧНИК НЕ ИД
		804.0		0.509					ВНИМАНИЕ! ИСТОЧНИК НЕ ИД
		882.0		0.546					ВНИМАНИЕ! ИСТОЧНИК НЕ ИД

ПЕРЕЧЕНЬ ДЕФЕКТНЫХ ЗВЕНЬЕВ
 ЭЛ.ДВИГ. # 1 ВАЛ# 1
 ПОДШИПНИК КАЧ. # 80209 ВАЛ# 1
 ПОДШИПНИК КАЧ. # 504710 ВАЛ# 1
 ПОДШИПНИК КАЧ. # 504710 ВАЛ# 1
 ЭЛ.ДВИГ. # 2.2 ВАЛ# 1
 ШВП 1 ВАЛ# 1

Рис. п.3.5. Диагностическая таблица, построенная по результатам проверки кинематической точности привода перемещения стойки станка мод. ИР 800, № 27625.

Помимо величины и частоты проявления указанной погрешности в диагностической таблице указываются узлы, которые могут являться источниками погрешности, а также возможные причины её появления.

В частности, рассматриваемый дефект с учётом частоты его проявления мог быть связан либо с повреждениями тел качения ШВП, либо с дефектом внутреннего кольца подшипника серии 504710.

Проведённая дополнительно визуальная и инструментальная ревизия винтовой передачи подтвердили правильность диагнозов, поставленных по результатам проверки кинематической точности привода. Причём, выявленные дефекты были связаны как погрешностями изготовления ШВП, так и с погрешностями, возникшими на этапах сборки и регулировки данного узла.

Следует также отметить, что по результатам контроля кинематической точности механизмов с винтовыми передачами, кроме рассмотренных выше дефектов, могут выявляться и другие, например такие, как перекося осей винта относительно базовых поверхностей направляющих станка, местный износ направляющих, зазоры направляющих и т.п. дефекты.

С учётом изложенного можно уверенно утверждать, что кинематометрия является эффективным методом контроля технического состояния механических узлов приводов станков с ЧПУ и может быть использована, например, при создании встроенных систем для их диагностирования.

Приложение 4

Повышение кинематической точности зубофрезерного станка мод. УРН 30 с помощью установки в цепи обката-деления механического коррекционного устройства

Работа по модернизации зубофрезерного станка мод. УРН 30 фирмы Давид Браун проводилась в середине 70-х годов на НПО «Пролетарский завод».

В то время турборедукторное производство этого предприятия, на котором изготавливались зубчатые передачи 3-4 степени точности, испытывало потребность в особо точном (класс А) зубообрабатывающем оборудовании с диаметром обработки от 500 мм и выше.

Отечественные станкостроительные заводы станков подобного класса точности с этими типоразмеров не выпускали, а вопрос закупок подобных станков у фирмы «Пфаутер» в Германии ещё находился в стадии согласования.

Поэтому перед специалистами нашего предприятия, принимавшими участие в централизованном техническом обслуживании зубообрабатывающего оборудования на НПО «Пролетарский завод», была поставлена задача повысить кинематическую точность нескольких находящихся в эксплуатации зубофрезерных станков, в том числе и станка мод. УРН 30.

Указанная задача для этого станка решалась путём его комплексной модернизации, совмещающей проведение ремонта станка с установкой в его цепи обката-деления механического коррекционного устройства.

После проведения модернизации кинематическая точность станка должна была соответствовать требованиям ГОСТ 659-67 «Станки зубофрезерные. Нормы точности» для станков особо высокой точности с диаметром обработки до 800 мм (накопленная погрешность - не более 12 угловых секунд, циклическая погрешность – не более 4 угловых секунд).

На рис.п.4.1 представлена кинематическая схема цепи обката-деления зубофрезерного станка мод. УРН 30, последующее рассмотрение которой позволяет лучше понять методологию, используемую при диагностировании технического состояния станка.

Для указанной цепи рассчитана таблица основных частот потенциальных дефектов станка (см. таблицу п.4.1), которая используется для целенаправленного выявления тех или иных дефектов его кинематической цепи.

Предремонтная проверка кинематической точности станка, проводилась при настройке его гитары деления на 100 нарезаемых зубьев.

Эта проверка решала две основные задачи – одну метрологическую, другую диагностическую.

Целью метрологической задачи являлось определение соответствия фактической точности станка требований, предъявляемым ГОСТ 659-67 «Станки зубофрезерные. Нормы точности» для станков класса точности А.

Целью диагностической задачи являлось выявление конкретных дефектных звеньев станка, являющихся основными источниками его погрешности.

Эта работа выполнялась с учётом принципов изложенных выше в приложении 1.

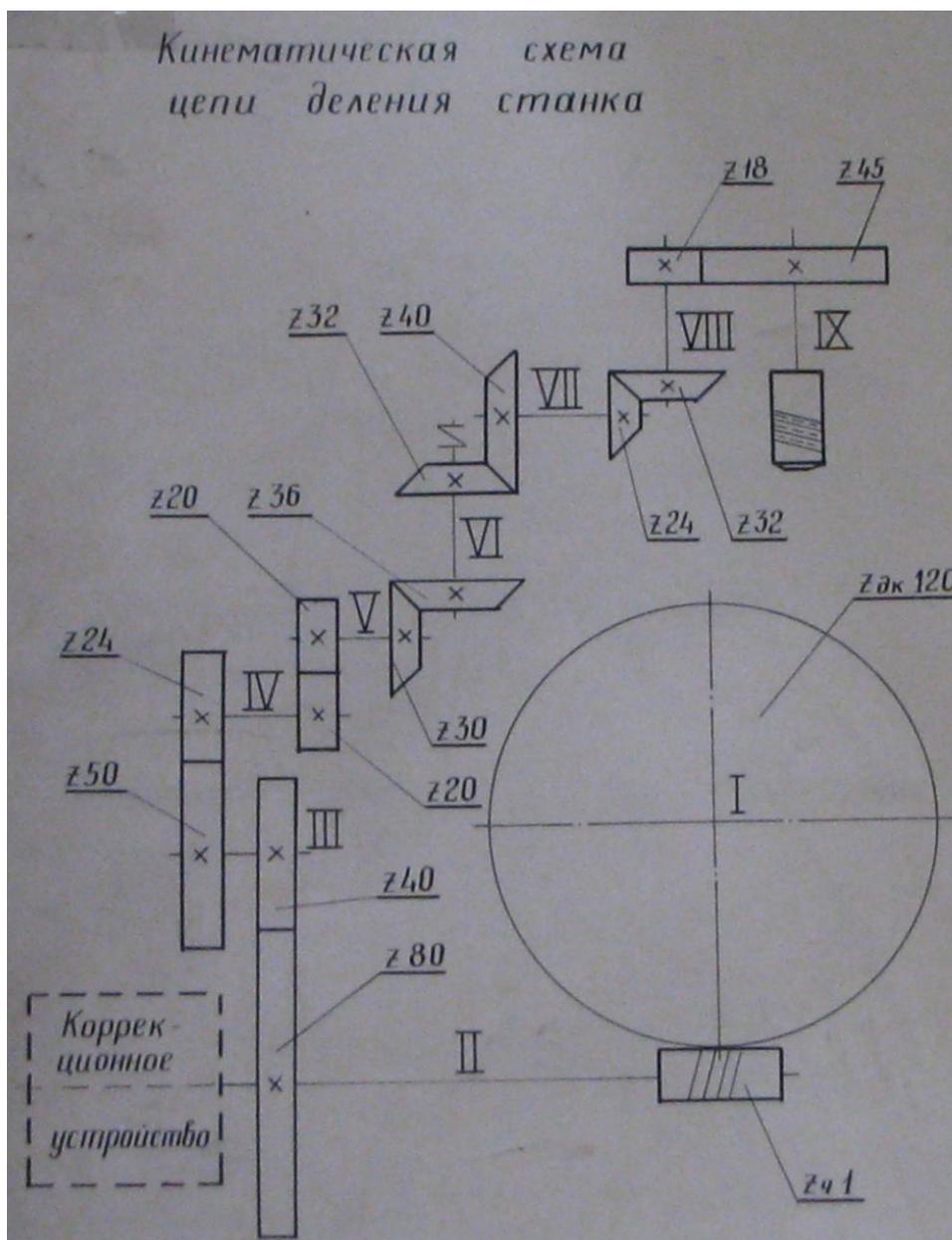


Рис. п.4.1. Кинематическая схема зубофрезерного станка мод. УРН 30

Таблица п.4.1

Таблица частот потенциальных дефектов цепи обката-деления
зубофрезерного станка мод. УРН 30

№ вала станка по схеме	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Частота вращения i -го вала цепи за один оборот стола станка	1	120	240	500	500	417	333	250	100

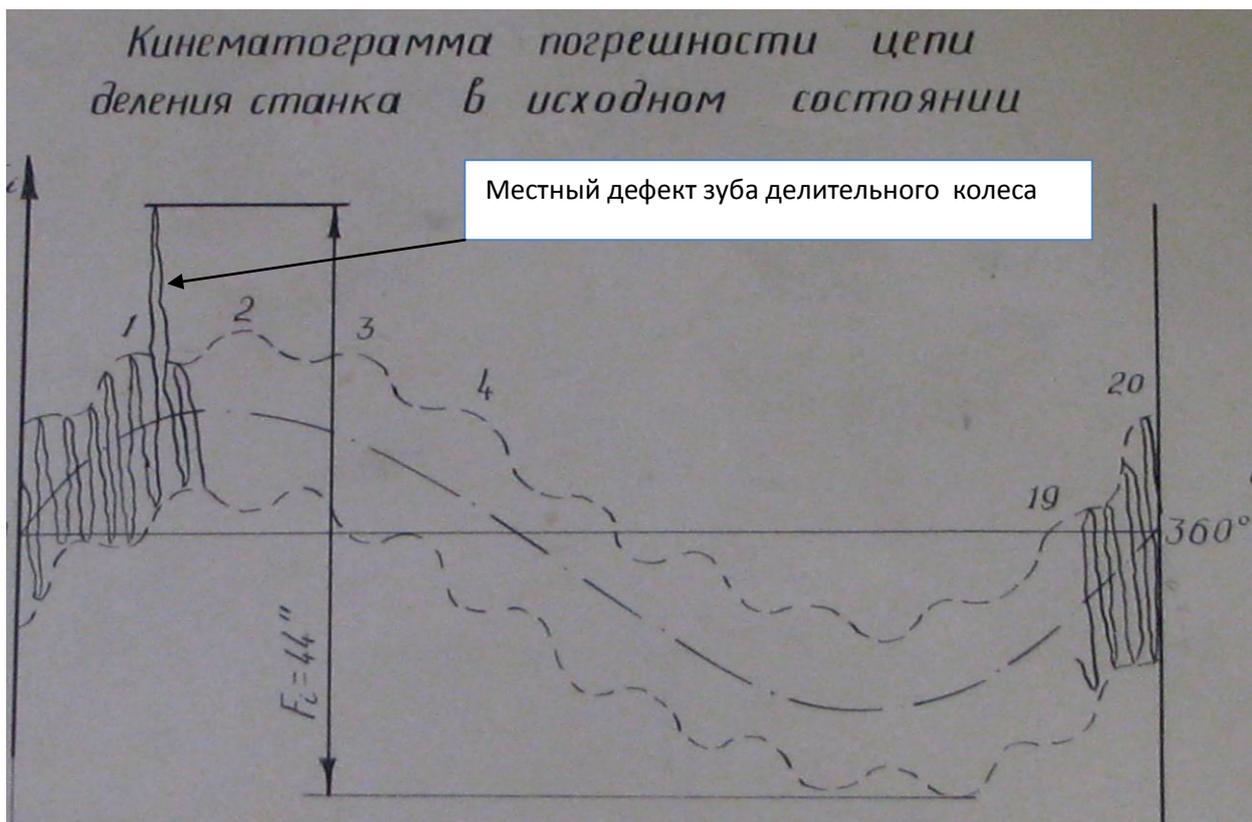


Рис. п.3.2. График кинематической погрешности станка мод. УРН 30
(Результаты предремонтной проверки).

Как показала проверка (см. графики, приведённых на рис. п.4.2 и п.4.3), кинематическая точность станка до модернизации соответствовала требованиям, предъявляемым к станкам нормального класса точности (класс Н).

При этом общая кинематическая погрешность станка, которая не нормируется по ГОСТ 659-67, составляла 44 угловые секунды.

Накопленная погрешность станка была равна 25 угловым, что соответствовало требованиям предъявляемым к станкам повышенного класса точности (класса П).

Циклическая погрешность станка соответствовала требованиям только нормального класса (класса Н) точности и была равна 14 угловым секундам.

По результатам проверки выявлены (диагностированы) следующие дефекты кинематической цепи станка:

- эксцентриситет червячного делительного колеса (геометрический и/или кинематический), приводящий к появлению повышенной накопленной погрешности станка (см. рис. п.4.3.а);
- местный дефект (забоина) зуба червячного делительного колеса станка достигающий 8 угловых секунд (см. рис. п. 4.3.б);
- дефекты упорных подшипников делительного червяка, приводящие к появлению составляющей циклической погрешности на частоте вращения червяка равной 120 циклам за оборот стола равной 11 угловым секундам (см. рис. п.4.3.б);
- дефекты подшипников шпиндельного узла, проявляющиеся на частоте 100

циклов за оборот стола с двойной амплитудой, равной 2.5 угловые секунды (см.

рис. п.4.3.в);

- дефекты промежуточных звеньев цепи деления, расположенных на валах IV и V и проявляющиеся на частоте 500 циклов за оборот стола с двойной амплитудой, равной 1 угловой секунде (см. рис. п.4.3.г).



Рис. п.4.3. Графики гармонических составляющих кинематической погрешности станка мод. УРН 30 (Результаты предремонтной проверки).

По результатам предремонтного диагностирования станка были проведены ремонтно-регулирующие работы, включавшие в себя:

- замену и последующую регулировку зазоров в упорных подшипниках червяка;
- регулировку зазоров в подшипниках инструментального шпинделя;
- устранение путём пришабривания забоины на зубе червячного делительного колеса.

Качество выполнения всех указанных ремонтно-регулирующих операций контролировалось с использованием кинематомера, что позволило существенно повысить кинематическую точность станка.

На рис.п.4.4 приведен график кинематической погрешности станка после ремонта.



Рис.п.4.4. График кинематической погрешности станка после ремонта.

Как видно из графика, в результате проведения целенаправленных ремонтно-регулирующих операций удалось существенно повысить кинематическую точность станка за счёт уменьшения его циклической погрешности.

При этом общая кинематическая погрешность станка снизилась с 44 до 29 угловых секунд.

Циклическая погрешность снизилась с 14 до 6 угловых секунд. Причём её основная составляющая, проявляющаяся на частоте вращения червяка (120 циклов за оборот стола), уменьшилась с 11 до 5 угловых секунд. Вторая по величине составляющая циклической погрешности, проявлявшаяся на частоте 100 циклов за оборот стола, за счёт качественной регулировки подшипников инструментального шпинделя снизилась до очень низкого уровня, практически не различимого при ручном анализе и расшифровке кинематограммы на фоне общей погрешности.

Также практически полностью была устранена местная циклическая погрешность связанная с забоиной зуба делительного колеса станка.

В результате проделанной работы станок по циклической погрешности стал удовлетворять требованиям высокого класса точности (класса В), сохранив накопленную погрешность на уровне класса П.

Как показал анализ кинематограммы, представленной на рис .п.4.4, основные составляющие кинематической погрешности станка, полученные после ремонта, были связаны с погрешностями изготовления и монтажа червячной делительной пары.

Дальнейшее снижение этих погрешностей путём традиционных ремонтно-регулирующих работ уже не представлялось возможным.

Замена существующего червячного делительного колеса станка на более точное в тот момент не представлялась возможной ни по техническим, ни по экономическим соображениям.

Поэтому для достижения необходимых для производства точностных характеристик, соответствующих требованиям, предъявляемым к станкам особо высокой точности, в кинематическую цепь обката-деления станка было встроено механическое коррекционное устройство.

Данное устройство было разработано на основе сгово-технических решений, предложенных в ЦНИИТМАШе (см. упомянутые в тексте основной статьи работы [12] и [16]).

При разработке варианта коррекционного устройства для станка мод. УРН 30 нашими специалистами был применён ряд оригинальных конструктивных решений, позволивших вписать его в габариты существующего отсека гитары деления станка и значительно облегчить настройку модифицированной гитары.

Кинематическая схема этого устройства приведена на рис. п.4.5 ([16]).

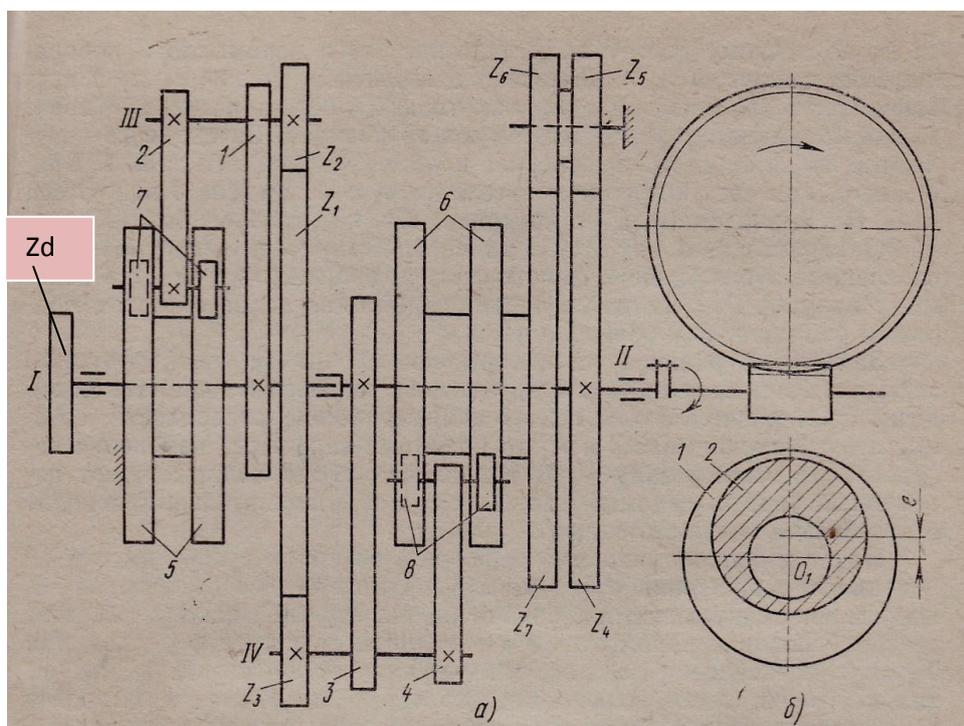


Рис. п.4.5. Кинематическая схема коррекционного устройства ЦНИИТМАШа

Как видно из рисунка п.4.5.а, устройство смонтировано на вале гитары деления, являющемся непосредственным продолжением вала червяка делительной пары станка.

Устройство состоит из двух механизмов, один из которых предназначен для компенсации накопленной погрешности делительного колеса станка, а другой – для компенсации циклической погрешности, проявляющейся на частоте вращения червяка (120 циклов за оборот стола).

Компенсация накопленной погрешности при прямом ходе и реверсе стола станка производится с помощью копиров (кулачков) 6, входящих в состав первого механизма. Эти копии профилируются контурным фрезерованием по результатам контроля накопленной погрешности станка.

Компенсация циклической погрешности при прямом ходе и реверсе стола станка производится с помощью эксцентриковых копиров (кулачков) 5, входящих в состав второго механизма.

Конструкция указанных кулачков позволяет регулировать параметры вектора их эксцентриситета (см. рис. п.4.5.б), в результате чего обеспечивается возможность компенсации циклической погрешности, проявляющейся на частоте вращения червяка станка.

Как уже отмечалось выше в основном тексте статьи, профилирование и настройка копиров коррекционного устройства производится с помощью кинематомера по результатам контроля кинематической точности станка.

На рис.п.4.6 представлен график кинематической погрешности станка мод. УРН 30, полученный после проведения профилирования и настройки копиров механизмов компенсации.

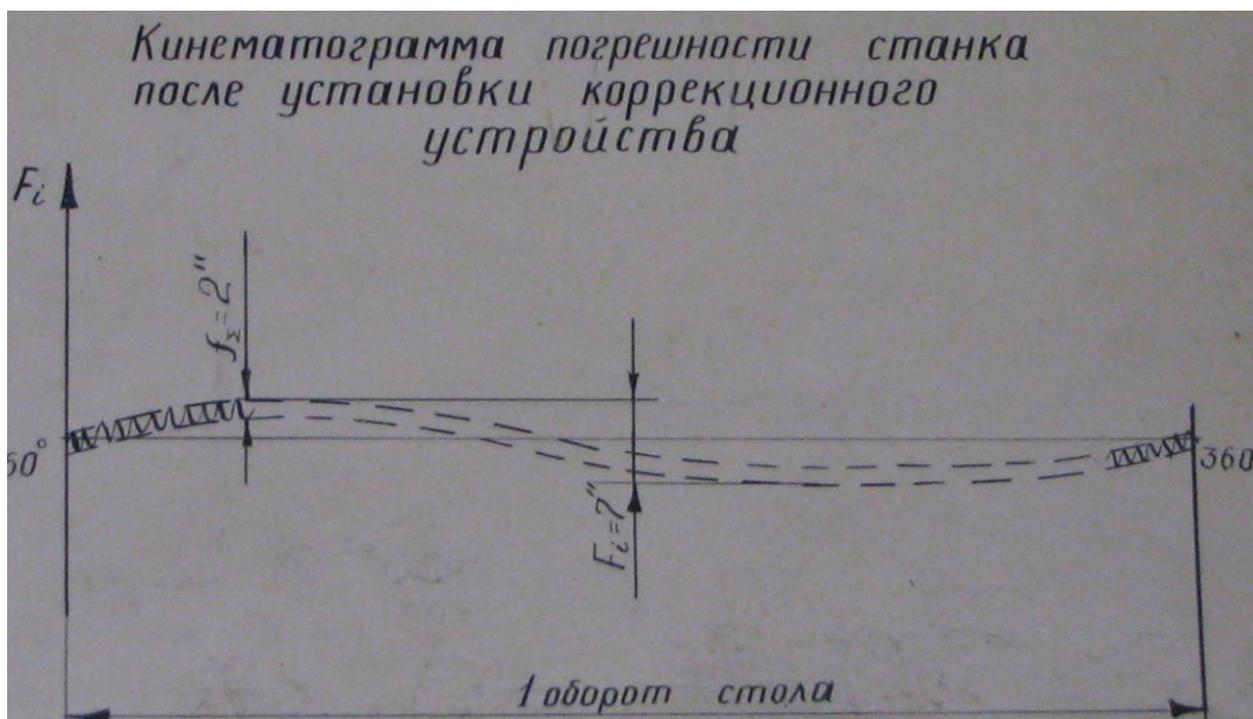


Рис.п.4.6. График кинематической погрешности станка мод. УРН 30, полученный после профилирования и настройки копиров коррекционного устройства.

Как видно из графика, общая величина кинематической погрешности станка после установки и отладки коррекционного устройства составила 9 угловых секунд.

При этом накопленную погрешность станка удалось снизить до 7 угловых секунд (при допуске равном 12 угловым секундам), а циклическую погрешность – до 2 угловых секунд (при допуске равном 4 угловым секундам).

Указанные характеристики соответствовали требованиям, предъявляемым к станкам особо высокой точности (класс А) по ГОСТ 659-67, и обеспечивали возможность нарезания на станке зубчатых колёс 3-4 степеней точности.

При этом следует ещё раз повторить, что достижение данного результата было бы невозможно без использования на всех стадиях модернизации станка кинематомера.

С его помощью не только выявлялись звенья - источники кинематической погрешности, но и проводились все необходимые ремонтно-регулирующие операции по устранению выявленных дефектов, а также выполнялись работы, связанные с профилированием и настройкой копиров коррекционного устройства.

В заключение данного раздела следует отметить, что направление, связанное с применением механических коррекционных устройств для повышения точности станков, во многом потеряло свою актуальность в связи с внедрением в производство и модернизацию зубообрабатывающего оборудования эффективных систем числового программного управления.

Однако позитивный опыт, который был накоплен при проведении данных работ, может быть полезен при внедрении методов и средств программной коррекции кинематической погрешности современного прецизионного зубообрабатывающего и резьбообрабатывающего оборудования, например в случае их модернизации с использованием «развязанной кинематики» и систем ЧПУ.

Приложение 5

Пример диагностирования волнового редуктора с использованием кинематомера Диакин-3

В качестве примера практического использования кинематомера «Диакин 3» для контроля зубчатых передач и редукторов рассмотрим результаты проверки кинематической точности волнового редуктора.

Кинематическая схема редуктора приведена на рис. п.5.1.

Проверяемый редуктор имел в своём составе ведущий вал, на котором установлен волновой генератор **h** с двумя роликами, неподвижное жёсткое зубчатое колесо **b** с числом зубьев $Z_b=204$ и подвижное гибкое зубчатое колесо **g** с числом зубьев $Z_g=202$, объединённое с ведомым выходным валом.

Передаточное отношение редуктора равно $i = 101$.

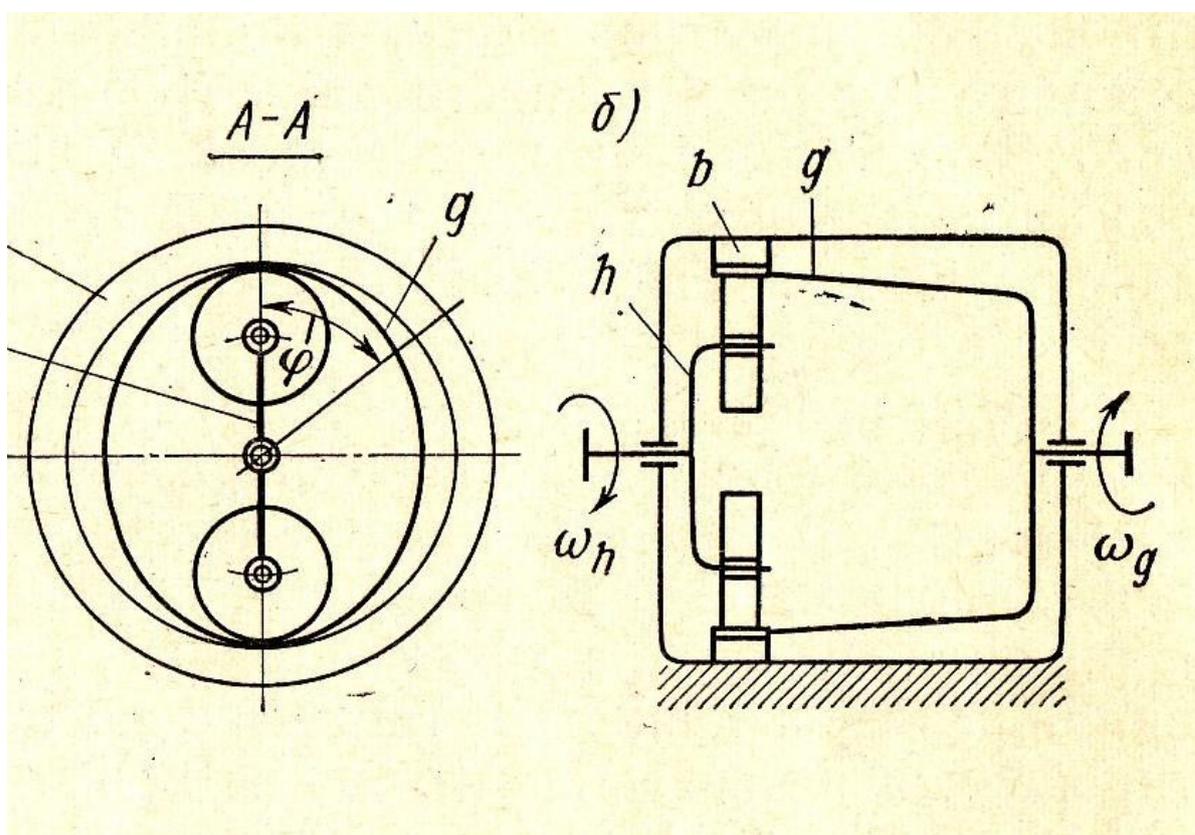


Рис. п.5.1. Кинематическая схема волнового редуктора

На рис. п.5.2. представлена фотография кинематомера «Диакин 3», использованного при проверке редуктора. На фотографии показаны измерительный блок кинематомера 1 и дисплей компьютера 2, на котором представлены графики временной функции и спектра кинематической погрешности. (Системный блок компьютера, также входящий в комплект кинематомера, на рисунке не показан.)

На рис. п.5.3., п.5.4. и п.5.5. представлены фотографии подготовленного к проверке волнового редуктора.

На фотографиях видно, что на выходном (тихоходном) вале редуктора 8 установлен инкрементный датчик 3 углового перемещения ЛИР 190А, а на входном (быстроходном) вале - датчик 4 углового перемещения ЛИР 350.

Датчики помощью кабелей подключены к соответствующим входам измерительного блока.

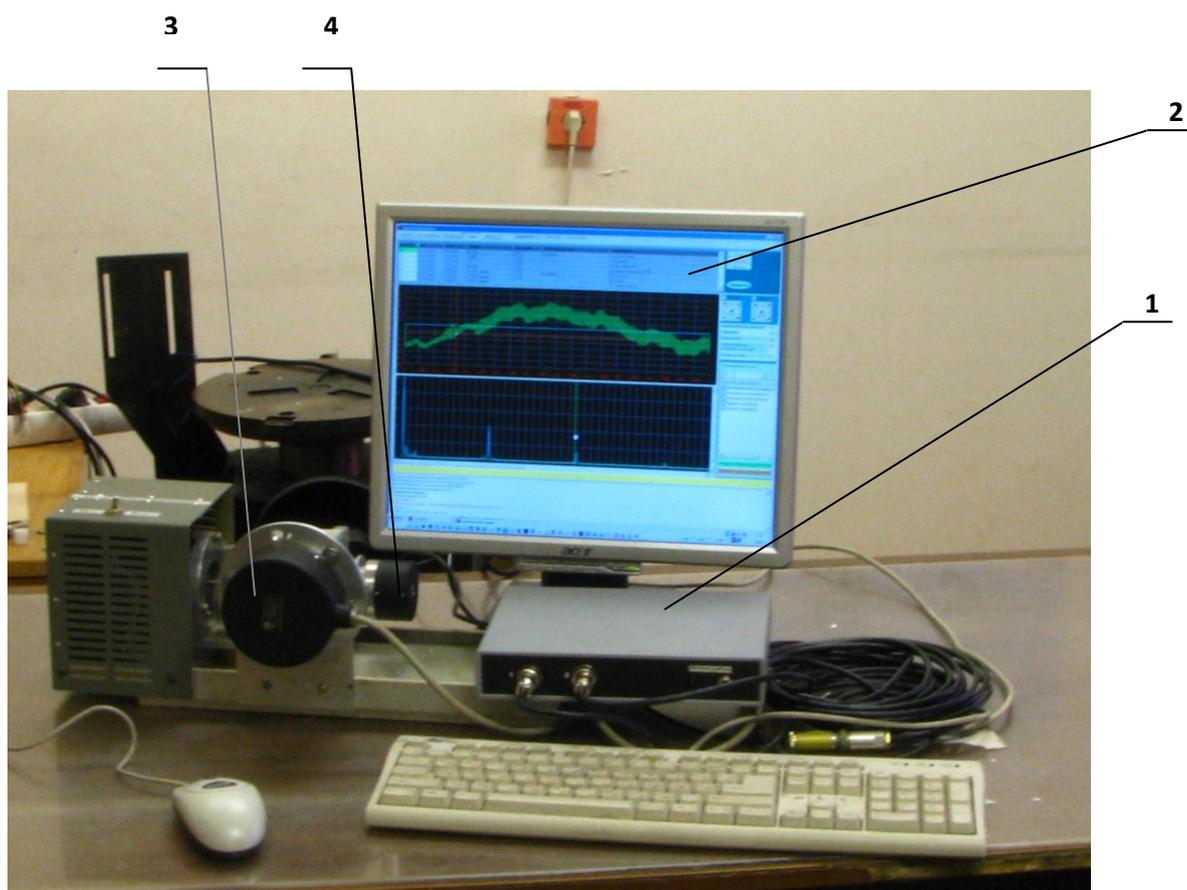


Рис. п.5.2. Использование кинематомера «Диакин 3» при проверке редуктора.

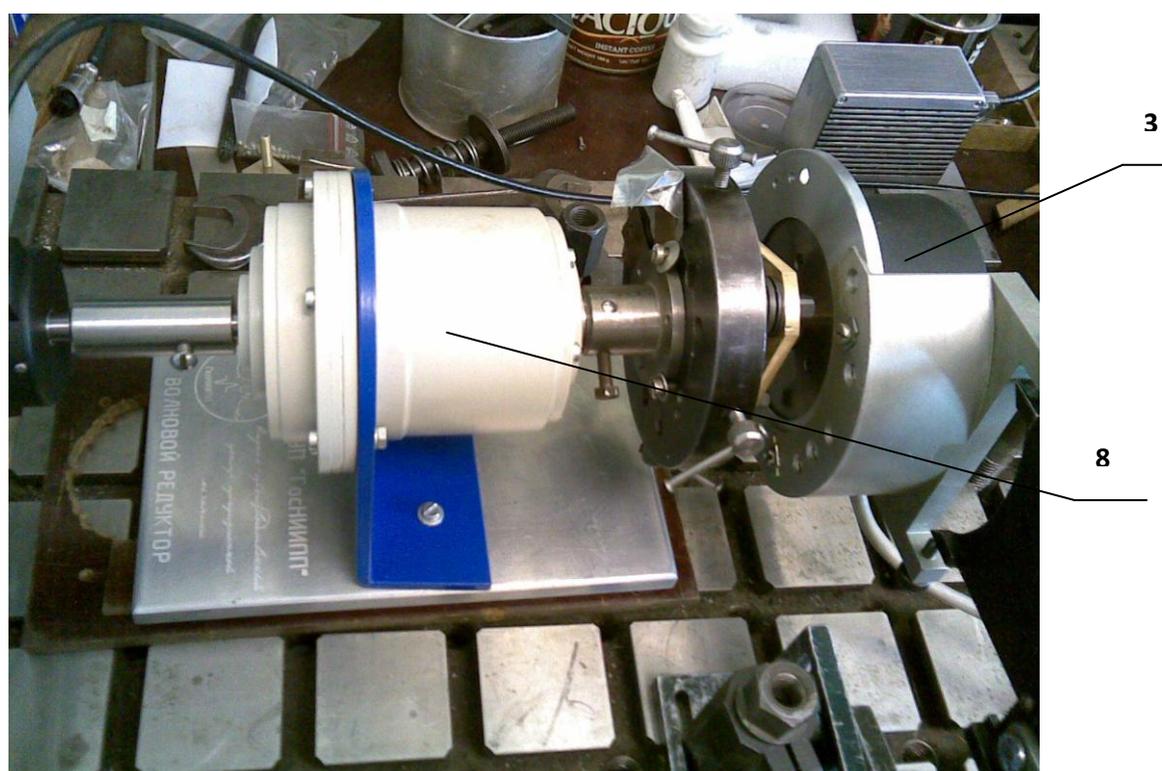




Рис. п.5.3. Волновой редуктор, подготовленный к проверке.

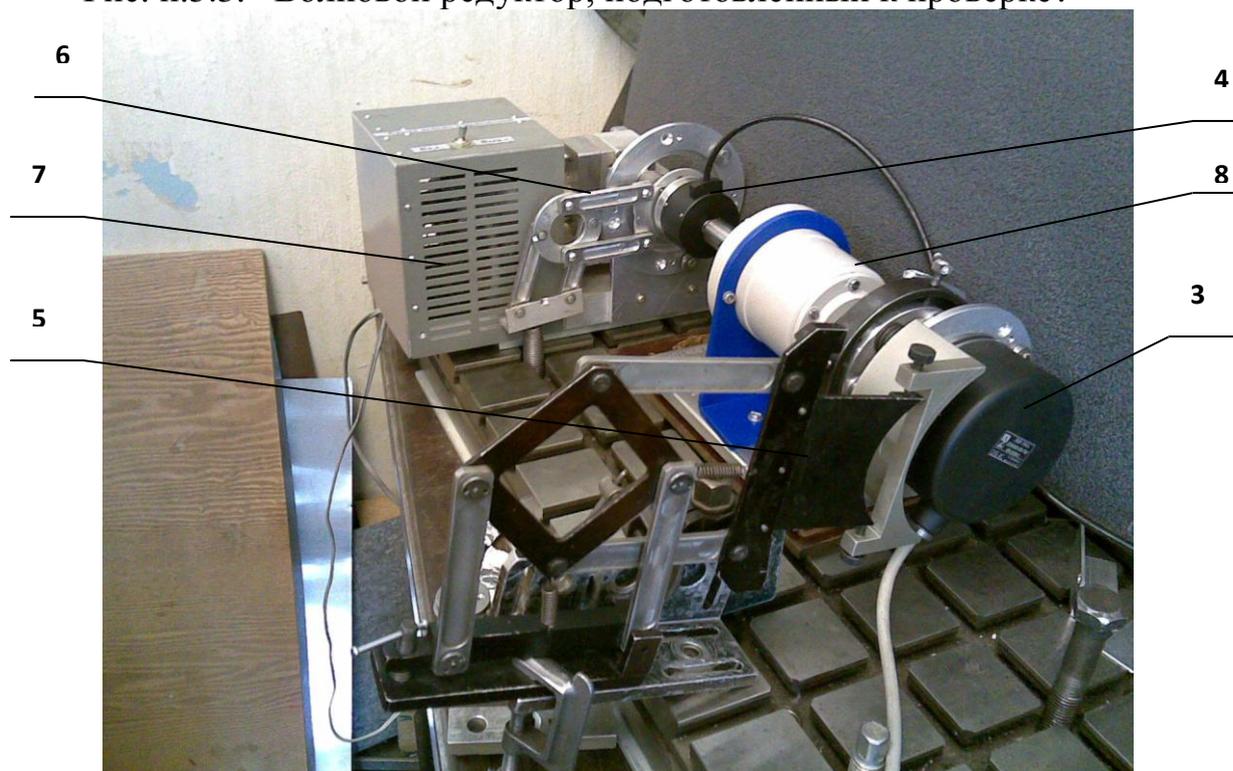


Рис.п.5.4. Подготовленный к проверке волновой редуктор, на входном и выходном валах которого установлены инкрементные датчики угловых перемещений (вид со стороны выходного вала).

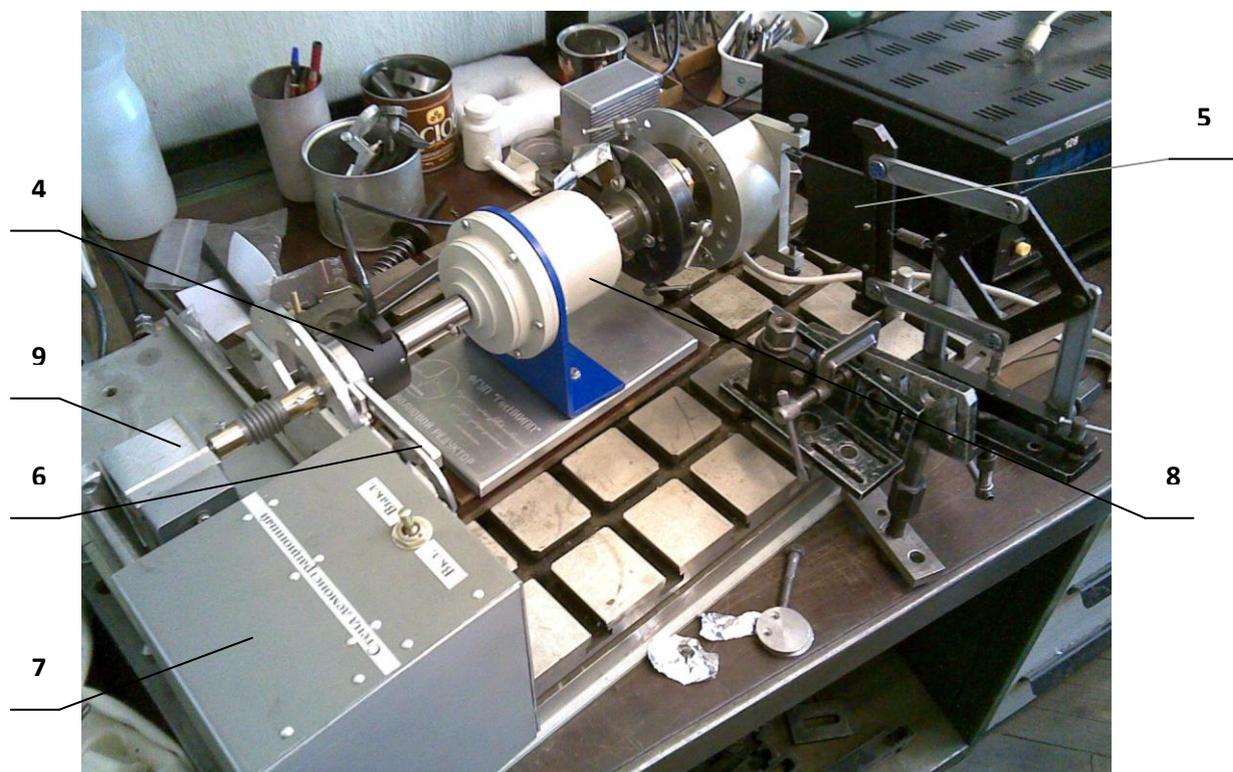


Рис.п.5.5. Подготовленный к проверке волновой редуктор, на входном и выходном валах которого установлены инкрементные датчики угловых перемещений (вид со стороны входного вала и привода) .

Для установки датчиков на валах редуктора использовались специальные юстировочные приспособления. Неподвижные части датчиков были зафиксированы от проворота с помощью пантографов 5 и 6.

Входной вал редуктора при проверке через гибкую муфту приводился во вращение с помощью электродвигателя 7 и вспомогательного понижающего редуктора.9.

Результаты измерения кинематической точности волнового редуктора приведены в представленном ниже протоколе проверки, который был сформирован кинематомером в автоматизированном режиме после завершения проверки.

Как видно из протокола (см. таблицу П.1), обследованный редуктор имеет значительную кинематическую погрешность, равную 1276 угловым секундам.

Накопленная погрешность редуктора при этом составляет 463 угловые секунды, а циклическая – 960 угловым секундам.

Анализ графиков временной функции и спектра кинематической погрешности (см. рис. п.5.6 – п.5.9), а также приведённой в протоколе диагностической таблицы (см. таблицу П.2), позволяет определить основные причины и источники погрешности редуктора и сделать выводы о его техническом состоянии (см. «Выводы по результатам проверки» в протоколе).

В этих выводах констатируется, что обследованный редуктор имеет неудовлетворительные характеристики, связанные как с погрешностями изготовления и сборки, входящей в его состав волновой зубчатой передачи, так и с конструктивными прочётами, характеризующимися недостаточной жёсткостью его выходного вала.

"ЭЛИТО"
 ОАО "СКБ" Индикатор"
 198095, г. С-Петербург
 ул. Шкапина, 32/34
 т. 252-0770
 Аттестат аккредитации
 лаборатории
 ТЕСТ - С-Петербург
 № SP01.01.0072.028
 от 09.03.2007 г.

Утверждаю
 Зам. главного инженера

В.Д.Фельдман
 12 мая 2009 г.

ПРОТОКОЛ ПРОВЕРКИ

кинематической точности волнового редуктора

Дата проведения измерений: 06-05-2009 г.

Использованное средство измерений: кинематомер «ДИАКИН-3»

Погрешность измерения: ± 5 угловых секунд

Наименование проверяемого изделия: волновая зубчатая передача

Инвентарный номер:

Передаточное отношение передачи: 101

Таблица п.1

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ

Направление вращения входного вала зубчатой передачи	Накопленная погрешность, угл.сек.	Циклическая погрешность, угл.сек.	Кинематическая погрешность, угл.сек.
По часовой стрелке	463.4	960.4	1276.6
Допуск			

Выводы по результатам проверки

1. В результате проверки выявлены следующие дефекты кинематических звеньев волновой передачи редуктора:
 - 1.1. Радиальный бой, перекос, люфт (до ± 0.5 мм) входного вала (вала генератора), проявляющийся на частоте 101 об./об.вых.вала.
 - 1.2. Недостаточно высокая жесткость выходного вала, приводящая к тому, что выходной вал имеет дополнительное биение, вызванное воздействием генератора.
 - 1.3. Вероятно имеют место эксцентриситет и/или повышенная накопленная погрешность неподвижного жесткого колеса. Этот дефект проявляется в виде накопленной погрешности волновой передачи. Кроме того наличие этого дефекта косвенно подтверждается наличием в спектре кинематической погрешности комбинационных частот, возникающих в результате модуляции зубцовой частоты передачи (204 об./об. вых. вала) и частоты вращения генератора (101 об./об. вых. вала) частотами, равными или кратными частоте вращения выходного вала.
 - 1.4. Вероятно имеет место повышенная накопленная погрешность, а также эксцентриситет оси вращения гибкого колеса относительно оси жесткого колеса, что также может влиять на величину накопленной погрешности передачи. На это также указывает наличие в спектре погрешности комбинационных частот.
 - 1.5. Вероятно имеют место погрешности профиля и шага зубьев жесткого и гибкого зубчатых колес передачи, следствием чего может

- являться наличие значительной циклической погрешности передачи на частоте 204 об./об. вых. вала и её гармониках.
- 1.6. Фактическая точность зубчатых колёс волновой передачи ниже 11 степени точности, что недопустимо для кинематических передач, используемых в ситемах управления.

Проверку проводил:

Шелковенко А.В.
Таблица П.2
(Приложение к протоколу)

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА № 1

Дата проведения измерений 06-05-2009 г.

Наименование изделия: волновая зубчатая передача

Инвентарный номер:

Передаточное отношение: 101

Направление вращения входного вала: по часовой стрелке

Частоты в об. вых. вала		Вел-на Погрешности угл. с	Допуск угл. с	Наименование детали	Вал	Вид дефекта (диагноз)
Реал	Расчет					
1	1	419.1		Выходной вал	Выходной вал	Зазор в подшипниках вала, Погрешности сборки
				зубч. колесо Z=202	Выходной вал	Погрешность изготовления и монтажа (накопленная погрешность, эксцентриситет оси вращения)
				зубч. колесо Z=204	Неподвижный вал	Погрешность изготовления и монтажа (накопленная погрешность, геометрический эксцентриситет)
6	-	18.3		--	----	Неизвестный дефект
10	-	10.8		--	----	Неизвестный дефект
13	-	8		--	----	Неизвестный дефект
18	-	6.7		--	----	Неизвестный дефект
97	-	12		--	----	Неизвестный дефект
101	101	161.7		Генератор	Входной вал	Эксцентриситет, перекос, зазоры в подшипниках
102	102	198.2		зубч. колесо Z=204	Неподвижный вал	Накопленная погрешность, эксцентриситет
103	103	42		зубч. колесо Z=204	Неподвижный вал	Накопленная погрешность, эксцентриситет
203	203	421		зубч. колесо Z=204	Неподвижный вал	Накопленная погрешность,

						эксцентриситет
204	204	541		зубч. колесо Z=204	Неподвижный вал	Погрешности изготовления зубьев (шаг, профиль)
				зубч. колесо Z=202	Выходной вал	Погрешности изготовления зубьев (шаг, профиль)
205	205	127		зубч. Колесо Z=204	Неподвижный вал	Накопленная погрешность, эксцентриситет
305	-	64.4		--	----	Неизвестный дефект
408	408	136.3		зубч. Колесо Z=204	Неподвижный вал	Погрешности изготовления зубьев (шаг, профиль)
				зубч. колесо Z=202	Выходной вал	Погрешности изготовления зубьев (шаг, профиль)
504	-	10.9		--	----	Неизвестный дефект
506	-	18.1		--	----	Неизвестный дефект
508	-	32.8		--	----	Неизвестный дефект
511	-	14		--	----	Неизвестный дефект
607	-	9.2		--	----	Неизвестный дефект
612	612	44.5		зубч. Колесо Z=204	Неподвижный вал	Погрешности изготовления зубьев (шаг, профиль)
				зубч. колесо Z=202	Выходной вал	Погрешности изготовления зубьев (шаг, профиль)
816	816	15.6		зубч. Колесо Z=204	Неподвижный вал	Погрешности изготовления зубьев (шаг, профиль)
				зубч. колесо Z=202	Выходной вал	Погрешности изготовления зубьев (шаг, профиль)

Графики погрешностей волновой передачи

Угл. сек.

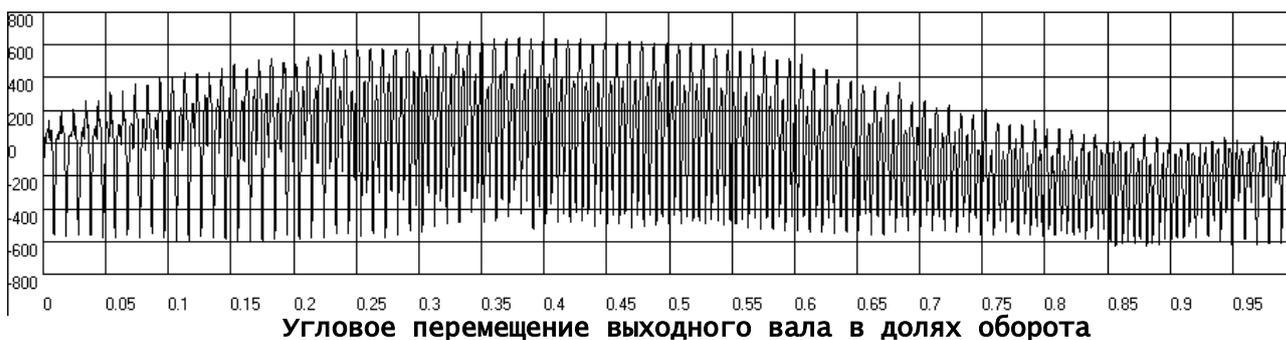


Рис.п.5.6. График временной функция кинематической погрешности волновой зубчатой передачи при вращении входного вала по часовой стрелке.

Угл.сек.

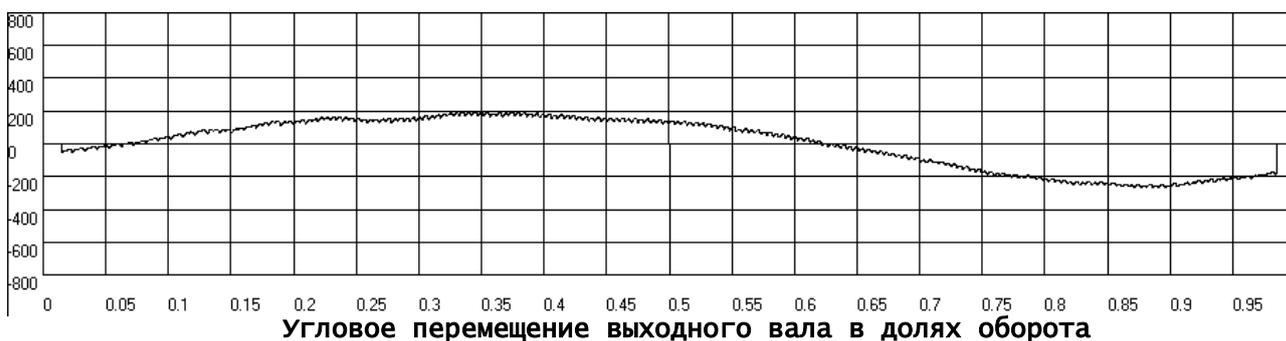


Рис.п.5.7. График временной функция накопленной погрешности волновой зубчатой передачи при вращении входного вала по часовой стрелке.

Угл.сек.

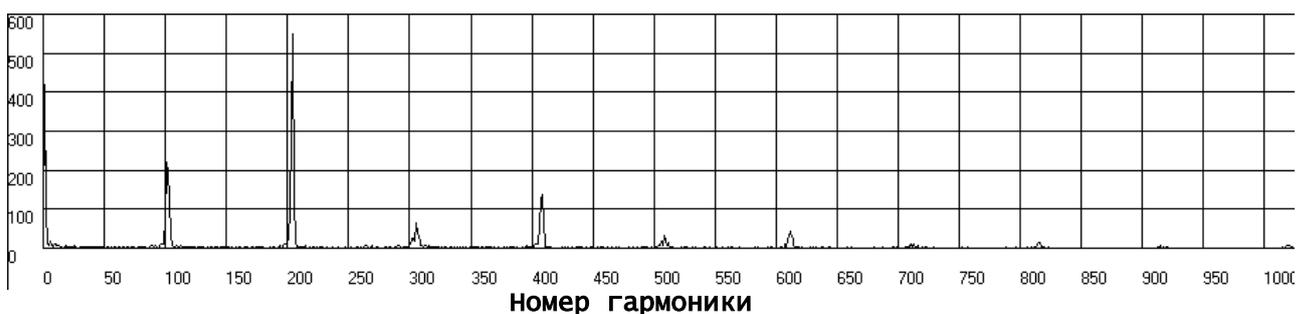


Рис.п.5.8. График спектра кинематической погрешности волновой зубчатой передачи при вращении входного вала по часовой стрелке с разрешением по частоте 1*1.

Угл.сек.

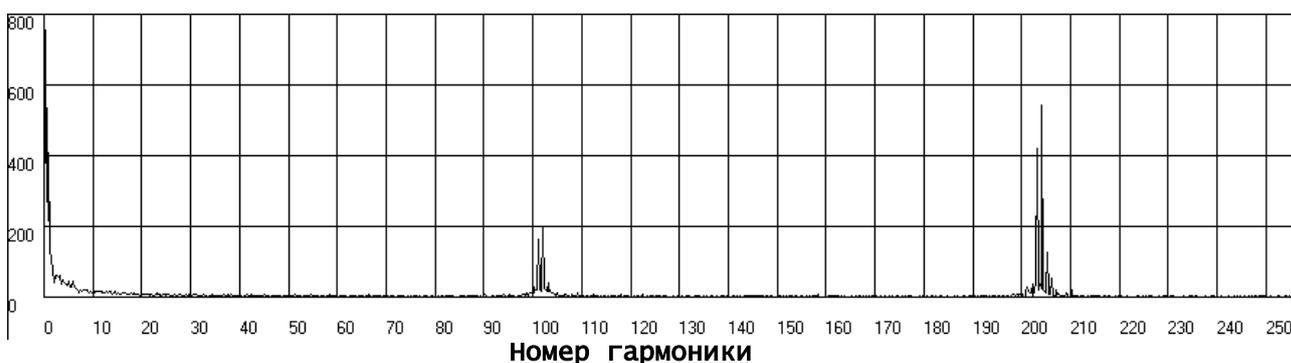


Рис.п.5.9. График спектра кинематической погрешности волновой зубчатой передачи при вращении входного вала по часовой стрелке с разрешением по частоте 1^*4 .

Приложение 6

Пример диагностирования планетарно-волновых редукторов систем управления остронаправленных антенн

Ещё одним примером эффективного использования кинематомера «Диакин 3» могут служить результаты проверки кинематической точности планетарно-волновых приводов, входящих в состав систем управления угловыми перемещениями остронаправленных антенн космических аппаратов.

Как и волновой редуктор, рассмотренный в предыдущем примере, данные механизмы относятся к классу кинематических зубчатых передач, основным критерием работоспособности которых является точность.

Поэтому контроль кинематической точности таких передач обычно рассматривается как один из важнейших этапов их приёмо-сдаточных испытаний.

Следует отметить, что с учётом требований, предъявляемым к режимам и условиям эксплуатации данных редукторов, проверка их точности выполняется по специальной программе, позволяющей в циклическом режиме измерять кинематическую погрешность механизма на заданных углах поворота выходного вала при его прямом ходе и реверсе.

При этом обеспечивается возможность помимо функции кинематической погрешности выявлять ошибки углового позиционирования выходного вала редуктора, ошибки, возникающие при возврате в начальную координату после выполнения полного реверсивного цикла, а также величины мёртвого хода в точках реверсирования.

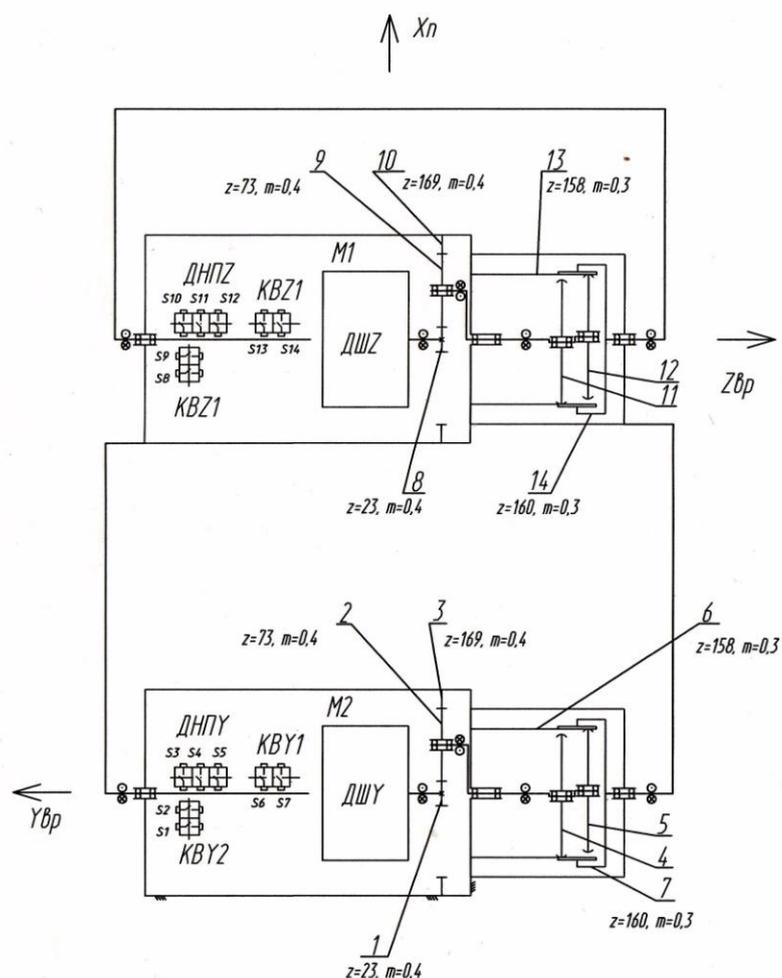
На рис. п.6.1 приведена кинематическая схема привода, состоящего из 2-х однотипных планетарно-волновых редукторов, обеспечивающих возможность углового позиционирования антенны по координатам Z и Y.

Общий коэффициент редукции механизма равен 667. 826. При этом коэффициент редукции первой (планетарной) ступени равен 8.348, а коэффициент редукции второй (волновой) ступени равен 80.

По сравнению со стандартной схемой измерения кинематической погрешности, рассмотренной в приложении 5, схема контроля указанных редукторов имеет одно принципиальное отличие. Это отличие связано с тем, что при проведении проверки используется только один инкрементный датчик углового перемещения кинематомера (типа ЛИР 190А), установленный на выходном валу контролируемого редуктора. Импульсные сигналы с выхода этого датчика подаются на вход 2 измерительно-вычислительного блока кинематомера.

В качестве второго датчика (датчика входного вала) задействован штатный привод ДШЗ (или ДШУ) редуктора. В этом случае система управления шагового привода генерирует последовательность управляющих импульсов, (200 импульсов за оборот входного вала редуктора). Указанный сигнал, управляющий работой шагового двигателя, параллельно используется как измерительный. Он подается на вход 1 измерительно-вычислительного блока кинематомера.

Реализация данной измерительной схемы позволяет охватить контролем всю кинематическую цепь привода, включающую помимо редуктора ещё и шаговый двигатель, что естественно повышает достоверность оценки его точностных возможностей.



Позиция	Наименование	Кол.	Примечание
1, 2, 8, 9	Колесо зубчатое цилиндрическое	8	
3, 10	Колесо зубчатое цилиндрическое с внутренним зубом	2	
4, 5 11, 12	Диск	4	
6, 13	Гибкое колесо	2	
7, 14	Выходной вал	2	
M1, M2	Электродвигатель	2	
S1..S14	Микропереключатель	14	

1. За положительное направление вращения выходных валов привода вокруг осей Z_{br} и Z_{vr} принимается вращение против часовой стрелки, если смотреть с положительного направления осей Z_{br} и Z_{vr} соответственно.
2. Ось Z_{vr} повернута против часовой стрелки на 90° , если смотреть со стороны положительного направления оси X_p .
3. Коэффициент редукции:
по оси Y - 667,826;
по оси Z - 667,826.

Рис. п.6.1. Кинематическая схема планетарно-волнового привода системы управления остронаправленными антеннами

Сравнительные результаты проверки двух различных приводов данного типа приведены ниже.

На рис. п.6.2 и п.6.3 представлены графики кинематической погрешности привода (кинематораммы) по координате Z , полученные при испытаниях, проведённых в декабре 2010 года.

В дальнейшем будем именовать его как привод 1.

График на рис. п.6.2 получен при нормальных климатических условиях (НКУ) и **без приложения дополнительной внешней нагрузки на выходной вал редуктора.**

Как видно из этого графика, полный цикл испытаний редуктора включает в себя четыре основных шага:

- прямой ход с заданным перемещением от 0° до $+10^\circ 59' 58''$ (ветвь графика прямого хода отображена серым цветом);
- обратный ход (реверс) с заданным перемещением от $+10^\circ 59' 58''$ до 0° (ветвь графика обратного хода отображена зелёным цветом);
- продолжение обратного хода (реверса) с заданным перемещением от 0° до минус $10^\circ 59' 58''$ (ветвь графика обратного хода отображена красным цветом);
- прямой ход с заданным перемещением от минус $10^\circ 59' 58''$ до 0° (ветвь графика прямого хода отображена голубым цветом).

Анализ графика, представленного на рис. п.6.2 (привод испытывался без нагрузки), позволяет сделать следующие выводы:

- Общая кинематическая погрешность привода 1, определённая на полном цикле измерения, не превышает 300 угловых секунд (при допуске 480 угловых секунд по ТУ).
- Кинематическая погрешность, определённая в пределах одного шага (для любого из 4-х шагов), не превышает 200 угловых секунд.
- Мёртвый ход в приводе практически отсутствует (при допуске по ТУ равном 240 угловым секундам).
- Погрешность позиционирования выходного вала привода на первом шаге при

- перемещении от 0° до $+10^\circ 59' 58''$ определяется в основном циклической погрешностью волновой передачи и не превышает ± 100 угловых сек
- Погрешность позиционирования выходного вала привода на втором шаге при перемещении от $+10^\circ 59' 58''$ до 0° также в основном определяется циклическими погрешностями волновой передачи. Её величина находится в диапазоне от $+ 200$ до минус 50 угловых секунд.
 - Погрешность позиционирования выходного вала привода на третьем шаге при перемещении от 0° до минус $10^\circ 59' 58''$ также в основном определяется циклическими погрешностями волновой передачи. Её величина находится в диапазоне от $+ 180$ до минус 50 угловых секунд.
 - Погрешность позиционирования выходного вала привода на четвёртом шаге при перемещении от минус $10^\circ 59' 58''$ до 0° определяется в основном циклической погрешностью волновой передачи и не превышает ± 100 угловых секунд.
 - Циклическая погрешность привода при прямом ходе (на первом и четвёртом шагах) в основном проявляется на относительной частоте 160 циклов за оборот выходного вала. Указанная частота соответствует зубцовой частоте жёсткого зубчатого колеса волновой передачи или удвоенной частоте вращения вала планетарного редуктора, на вале которого установлено 2 кулачка генератора волновой передачи.
Вероятные причины проявления циклической погрешности на этой частоте могут быть связаны, как с дефектами профилей зубьев гибкого и жёсткого зубчатых колес волновой передачи, так и с дефектами изготовления и сборки двухкулачкового генератора волновой передачи.
 - Циклическая погрешность привода 1 при реверсе помимо составляющей на частоте 160 циклов за оборот выходного вала содержит составляющую, проявляющуюся на частоте близкой к 320 циклам за оборот выходного вала. На данном этапе исследований трудно однозначно идентифицировать источник данной составляющей. Однако с учётом опыта контроля аналогичных изделий можно предположить, что её проявление скорее всего также связано с дефектами изготовления волновой передачи.

На рис. П.6.3 представлен график кинематической погрешности того же привода по координате Z , полученный при нормальных климатических условиях (НКУ), но в условиях приложения **дополнительной нагрузки на выходной вал редуктора**.

Как видно из этого графика, общий уровень кинематической погрешности под действием нагружающей силы возрастает до 400 угловых секунд (при допуске 480 угловых секунд).

Кроме того, в случае приложения нагрузки резко (до 280 угловых секунд) возрастает величина мёртвого хода привода при реверсе, что несколько превышает установленный по ТУ допуск (240 угловых секунд).

Указанное изменение величины мёртвого хода может быть связано с увеличением под нагрузкой силы трения покоя в сопряжённых соединениях редуктора, что повышает величину момента трогания и соответственно вызывает упругую деформацию промежуточных звеньев редуктора при реверсе.

Сопоставление графиков, представленных на рисунках п.6.2 и п.6.3 также показывает, что в случае приложения нагрузки существенные изменения претерпевает форма кривой кинематической погрешности.

В частности значительно снижаются составляющие кинематической погрешности, проявляющиеся на частотах 160 и 320 циклов за оборот выходного вала редуктора. В результате чего кинематическая погрешность, выявленная, например, на первом шаге

(при перемещении от 0° до $+10^\circ 59' 58''$ под нагрузкой) уменьшается до 50 угловых секунд, что почти в 4 раза меньше погрешности, полученной без нагрузки.

Аналогичные изменения наглядно наблюдаются и на других ветвях графика.

В этой связи можно предположить, что указанные изменения могут быть связаны либо с изменением формы гибкого колеса, которое происходит в условиях увеличения внешней нагрузки, либо с упругими деформациями зубьев жесткого и гибкого колес волновой передачи под нагрузкой.

Следует также отметить, что на фоне общего снижения кинематической погрешности начинает устойчиво просматриваться составляющая циклической погрешности, проявляющаяся на частоте 1336 циклов за оборот выходного вала редуктора (удвоенная частота вращения входного вала планетарного редуктора).

Возможной причиной появления этой составляющей является овальность ведущего зубчатого колеса Z23 планетарного редуктора, которая может возникнуть при посадке колеса на вал шагового двигателя.

Особое внимание следует обратить на выбросы, которые имеют место на реверсивных ветвях графика кинематической погрешности и достигают 120 угловых секунд (см. рис. п.6.3).

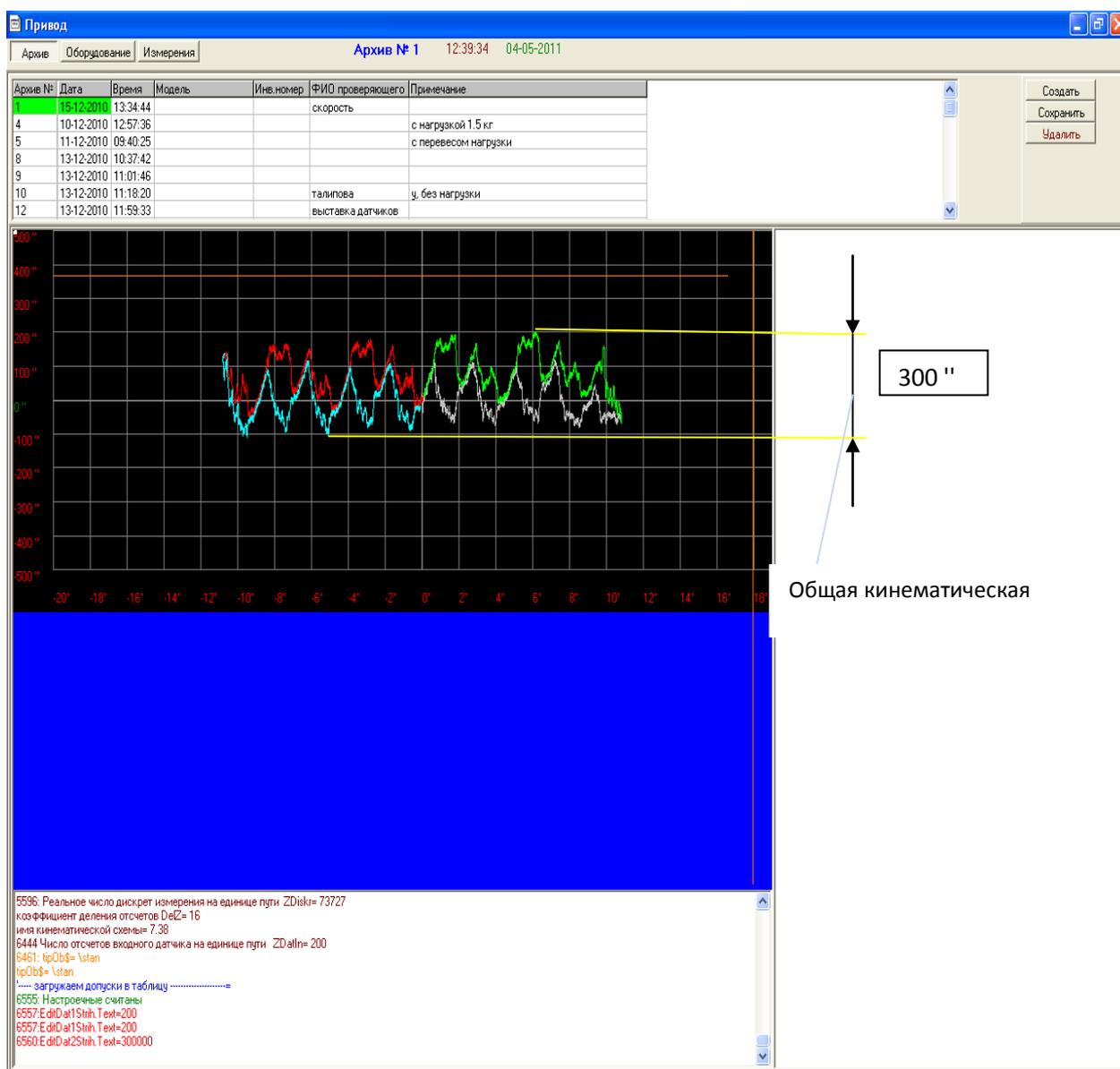


Рис. п.6.2. График кинематической погрешности планетарно-волнового редуктора по оси Z (НКУ, без нагрузки).

Указанные выбросы имеют период повторения, соответствующий одному обороту водила планетарной передачи (или, что однозначно, кулачкового генератора волновой передачи). Можно предположить, что данный дефект связан с местным заеданием, которое возникает работе одного из этих звеньев и приводит к торможению дефектного звена в зоне заедания.

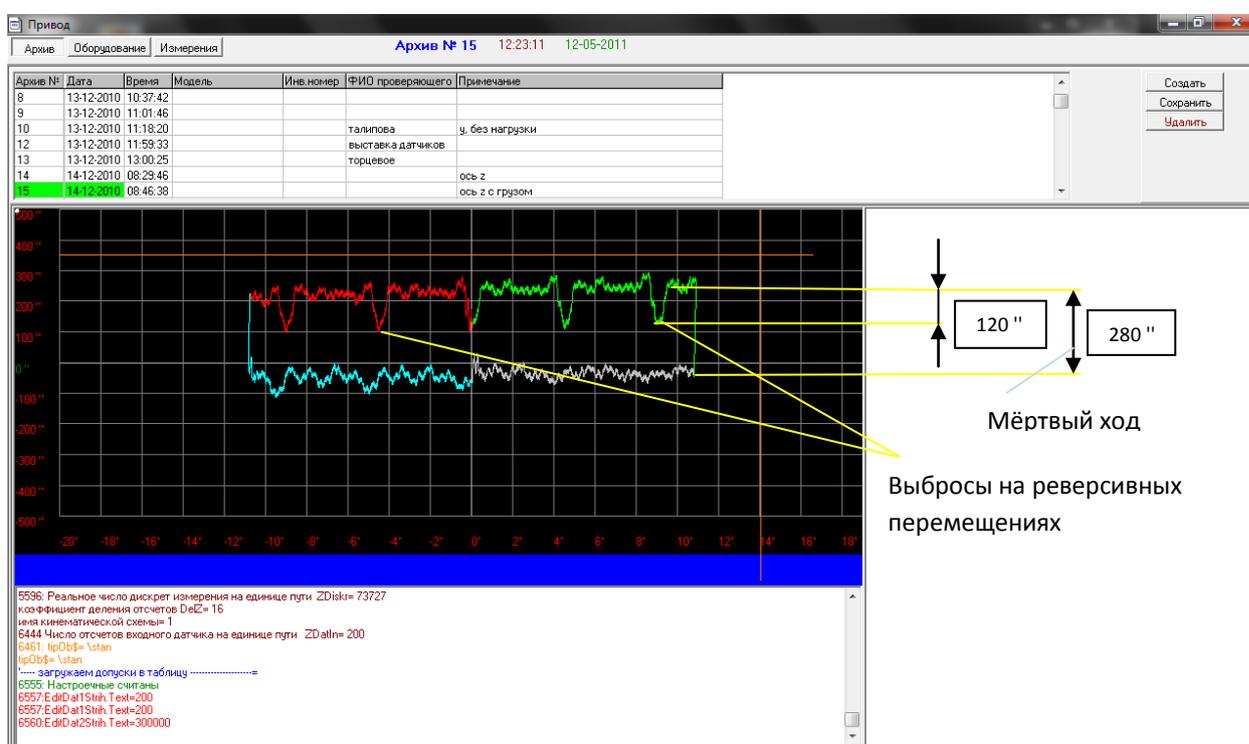


Рис. п.6.3. График кинематической погрешности планетарно-волнового редуктора по оси Z (НКУ, с нагрузкой по направлению вращения).

На рис. п.6.4 и п.6.5 представлены графики проверки кинематической точности аналогичного привода (привода 2), которая проводилась в марте 2011 г.

Эти графики имеют ряд принципиальных отличий по сравнению с графиками, полученными для привода 1.

В частности из графика на рис. п.6.4, видно, что при проверке без нагрузки, привод 2 имеет значительный мёртвый ход, который при реверсе достигает 300 угловых секунд. Это на 60 угловых секунд превышает допуск, установленный по ТУ.

Для сравнения у первого привода мёртвый ход без нагрузки практически отсутствует.

Общая кинематическая погрешность привода 2, определённая на полном цикле измерения, достигает 480 угловых секунд, что соответствует верхней границе допуска.

Для сравнения это в 1.6 раза больше, чем у привода 1.

Кроме того, в отличие от графика на рис. п.6.2, у привода 2 на рис. п.6.4 наблюдается существенное различие формы кривой кинематической погрешности при прямом ходе и при реверсе.

При этом на ветвях графика кинематической погрешности привода 2, полученных при реверсе, наблюдается циклическая составляющая с частотой близкой к 240 циклам за оборот выходного вала редуктора. Причём удвоенная амплитуда данной составляющей достигает почти 200 угловых секунд.

Указанная составляющая при проверке привода 1 не проявлялась.

Появление этой составляющей вероятно связано с погрешностью, возникающей при взаимодействии ведущего зубчатого колеса Z23 планетарного редуктора с его сателлитами Z73.

С учётом выявленных выше признаков можно предположить, что основные причины погрешностей привода 2 связаны с дефектами изготовления и сборки планетарной передачи (люфтами, перекосами, несоосностями).

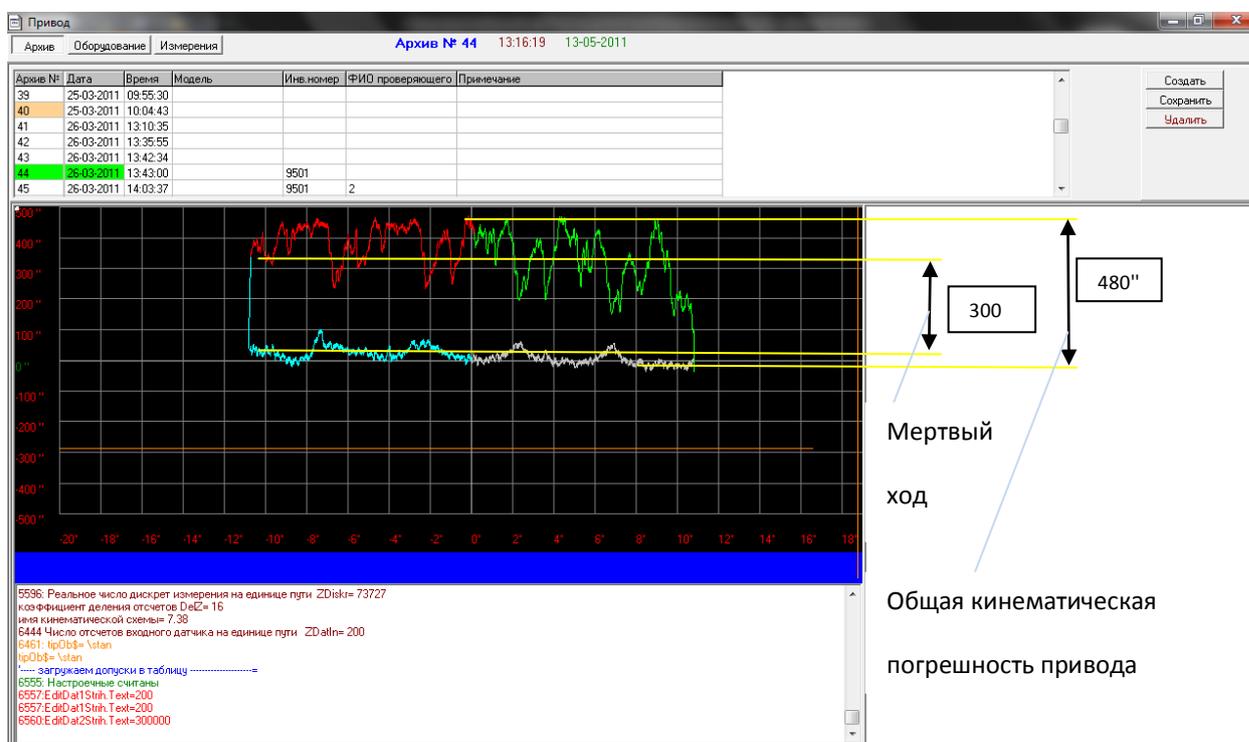


Рис. п.6.4. График кинематической погрешности планетарно-волнового редуктора по оси Z (НКУ, без нагрузки).

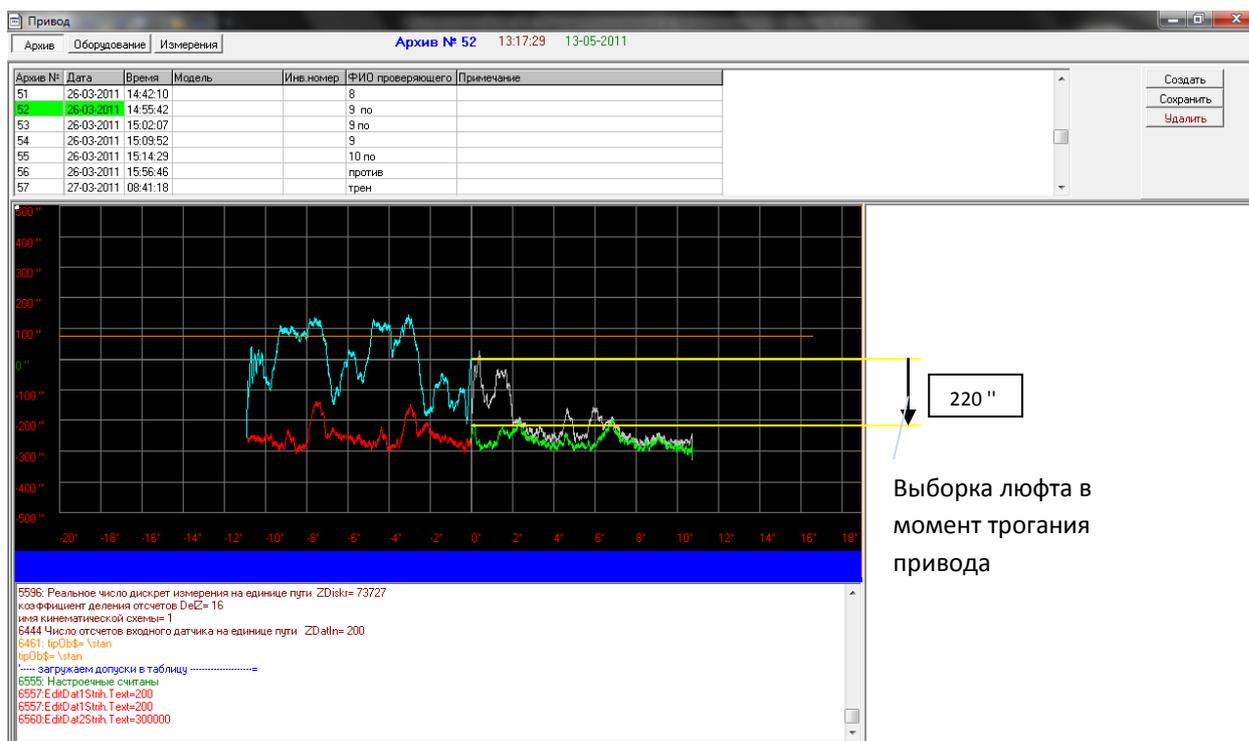


Рис. п.6.5. График кинематической погрешности планетарно-волнового редуктора по оси Z (НКУ, с нагрузкой по направлению вращения).

Этот вывод косвенно подтверждается графиком кинематической погрешности привода 2 (см. рис. п.6.5), полученным при приложении к его выходному валу внешней нагрузки, направление действия которой совпадает с направлением вращения.

На графике ясно видно, что в момент начала перемещения входного вала привода кривая кинематической погрешности (см. серую ветвь графика) под действием нагрузки резко изменяется от 0 до минус 220 угловых секунд.

Указанный эффект может быть объяснён тем, что под действием внешней нагрузки происходит выборка люфта, который предположительно имеет место в звеньях планетарного редуктора.

Как видно из рис.п.6.3, в приводе 1 подобный скачок в начальный момент его перемещения отсутствует.

Сопоставляя результаты контроля кинематической точности двух однотипных приводов, можно сделать следующие выводы:

- качество изготовления и сборки привода 1 значительно выше, чем у привода 2;
- у каждого из приводов имеются свои собственные (не похожие друг на друга) виды дефектов (у привода 1 основные дефекты предположительно связаны с работой волновой передачи, а у привода 2 – с работой планетарной передачи), что указывает на относительную нестабильность технологии изготовления и сборки приводов;
- с целью повышения качества изготовления приводов, а также снижения издержек производства, связанных с запоздалым выявлением дефектов приводов на стадии их приёмо-сдаточных испытаний, целесообразно предусмотреть возможность предварительной отдельной проверки кинематической точности волновой и планетарной передач в процессе их изготовления.

Приложение 7

Пример контроля кинематической точности зубодолбёжного станка мод. 5М150 ПФЗ с использованием киинематомера Диакин-3

В марте 2009 года нашими специалистами проводилась проверка кинематической точности зубодолбёжного станка мод.5М150 ПФ, который прошёл модернизацию на одном из станкостроительных заводов С-Петербурга.

Принципиальной особенностью данной модернизации являлось то, что согласованные угловые перемещения ветвей стола и долбяка станка были обеспечены с помощью двух независимых приводов, управляемых системой ЧПУ.

При этом в значительной степени были сокращены механические звенья цепи обката-деления, в том числе: зубчатые колёса гитары деления, конические зубчатые колёса и т.д.

Такая модернизация, по мнению разработчиков, должна была положительно сказаться как на производительности, так и на точности станка.

Проверка подобного оборудования, имеющего «развязанную» кинематику цепи обката-деления, производилась нами впервые.

В процессе её выполнения решались две основные задачи.

Во-первых, проверялась принципиальная возможность достижения заявленного разработчиками класса точности станка, которая во многом зависела от согласованной работы приводов ветвей стола и штосселя, управляемых системой ЧПУ станка.

Во-вторых, выполнялись рутинные работы по диагностированию технического состояния и оценке качества изготовления и сборки механических звеньев цепи обката-деления станка после ремонта.

Кинематическая схема зубодолбёжного станка мод. 5М150 ПФ представлена на рис.п.7.1.

На схеме показаны две ветви цепи обката-деления станка – ветвь стола и ветвь штосселя долбяка, каждая из которых имеет свой собственный привод.

Настройка и согласованная работа этих приводов обеспечивается программно с использованием системы ЧПУ станка.

При проведении проверки цепь обката-деления станка была программно настроена на соотношение чисел зубьев нарезаемого колеса (Z_k) и долбяка (Z_d) равное $Z_k/Z_d=3/1$.

Иными словами в процессе проверки за один оборот стола шпиндель штосселя совершал три полных оборота.

На рис. п.7.2 и п.7.3. представлены фотографии установленного на зубодолбёжном станке кинематомера «Диакин-3».

Как видно из рисунков, на столе и шпинделе штосселя станка с помощью специальных юстировочных приспособлений были установлены датчики угловых перемещений.

Конструкция указанных приспособлений позволяет проводить выставку датчиков в радиальном и торцовом направлениях точностью до 0.005 – 0.02 мм, что обеспечивает возможность измерения кинематической точности зубодолбёжного станка погрешностью не превышающей 2.5 – 3 угловых секунд .

Датчики фиксируются от проворота с помощью пантографов, конструкция которых позволяет исключать дополнительную погрешность измерения, которая может иметь место при наличии оставшегося после выставки радиального биения датчика.

На заднем плане рис. п.7.2 видна аппаратная часть кинематомера (измерительно-вычислительный блок и компьютер), которая соединена с датчиками с помощью кабелей.

Результаты, полученные при проведении контроля кинематической точности станка, приведены ниже в Протоколе проверки от 31 марта 2009 г., сформированным прибором в автоматизированном после завершения процесса измерений.

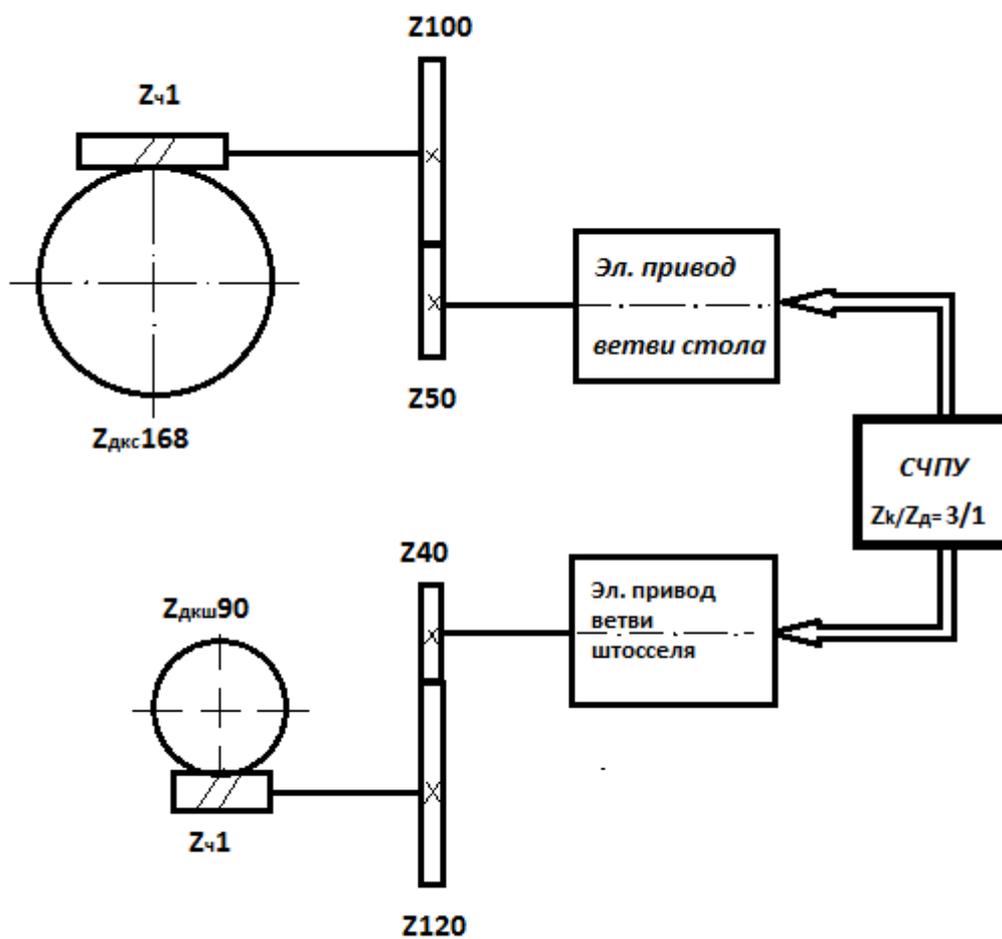


Рис.П.6.1. Кинематическая схема цепи обката-деления зубодолбежного станка 5М150 ПФ

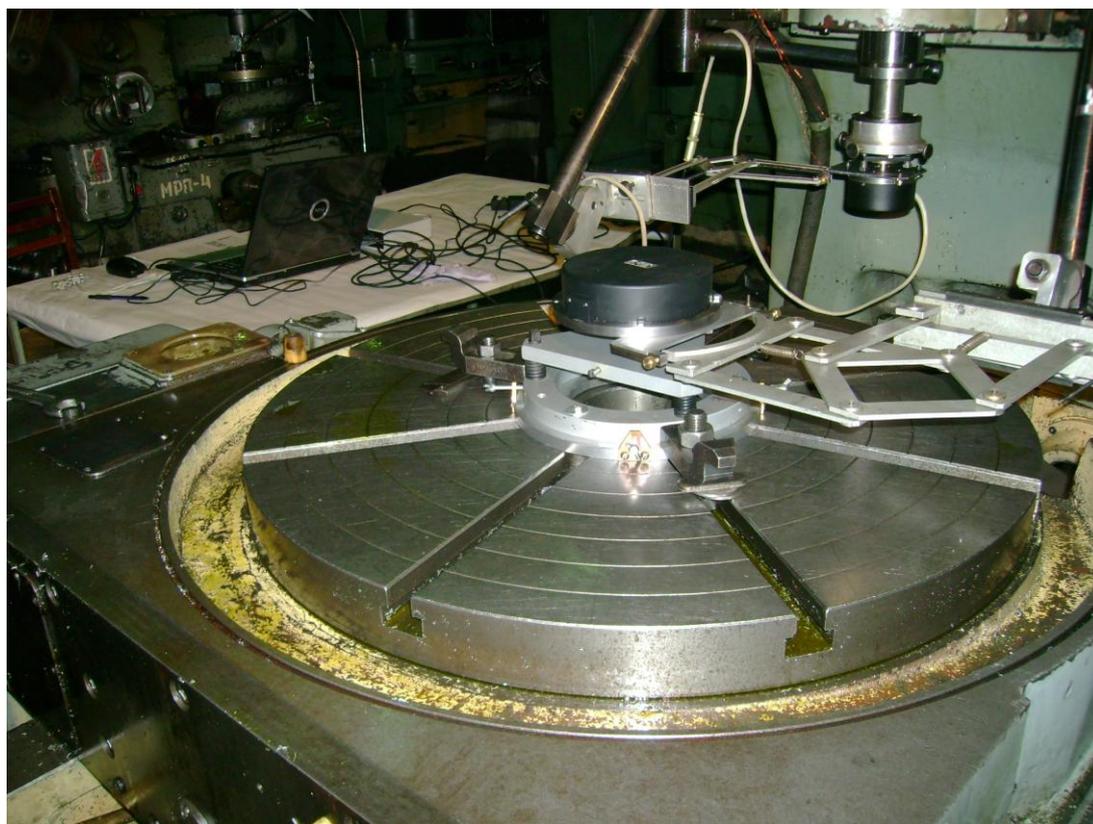


Рис. П.6.2. Проверка кинематической точности зубодолбёжного станка мод. 5М150 ПФ (вид сбоку).



Рис. П.6.3. Проверка кинематической точности зубодолбёжного станка мод. 5М150 ПФ (вид спереди).

Как видно из таблицы 1 протокола проверки, в которой производилась «метрологическая» оценка соответствия точности станка требованиям ГОСТ 658-89 «Станки зубодолбежные. Нормы точности», фактическая точность цепи обката станка на момент проверки удовлетворяла требованиям только нормального класса точности (класса «Н»).

Это на один класс ниже паспортной точности станка (класс «П»), которую предполагалось достигнуть при проведении его модернизации и ремонта.

Анализ данных, представленных на графиках временной функции и спектра кинематической погрешности (рис. п.7.4 – п.7.7), а также в диагностических таблицах 1 и 2, позволил выявить (диагностировать) основные причины неудовлетворительной точности станка.

Перечень дефектов станка, на которые было обращено внимание Изготовителя в Выводах по результатам проверки, оказался довольно значительным и включал в себя:

- местные дефекты зубьев червячных делительных колёс стола и штосселя (см. рис. п.2.4 и п.2.6);
- радиальное (или возможно торцовое) биение червячного делительного колеса штосселя;
- заедание в подшипниках шпинделя штосселя;
- заедание в упорных подшипниках делительного червяка стола, имеющее место при вращении стола по часовой стрелке;
- кинематический и/или геометрический эксцентриситет цилиндрического зубчатого колеса Z40, установленного на вале 5 в ветви штосселя.

Следует особо отметить, что в результате проверки не было выявлено заметных составляющих кинематической погрешности станка, связанных с рассогласованием работы управляемых электроприводов, установленных в ветвях стола и штосселя станка.

Изготовитель станка по результатам проверки провёл разборку и визуальный осмотр предполагаемых дефектных звеньев станка, которые полностью подтвердили правильность диагнозов по всем указанным выше позициям.

Для устранения выявленных дефектов был выполнен комплекс ремонтно-регулирующих работ, которые включали в себя:

- замену дефектного червячного делительного колеса штосселя;
- замену зубчатого колеса Z40 в ветви штосселя;
- регулировку упорных подшипников червяка стола.

В результате проделанной работы часть дефектов, выявленных на стадии предварительной проверки станка были устранены.

Как видно из приведённого ниже протокола повторной проверки (Протокол №2), проведенной при сдаче станка Заказчику, его точность после устранения части выявленных дефектов удалось повысить до уровня паспортных требований - класса «П» по ГОСТ 658-89.

В выводах по результатам повторной проверки также отмечено, что Изготовителю не удалось устранить ряд дефектов, выявленных при проведении предварительной проверки, в том числе:

- местные повреждения зубьев червячного делительного колеса стола;
- заедание одного из упорных подшипников червяка.

В случае устранения этих дефектов точность станка могла бы быть повышена до класса «В».

ПРОТОКОЛ ПРОВЕРКИ №1
кинематической точности цепи обката-деления
зубодолбежного станка
(предварительная проверка у изготовителя)

Дата проведения измерений 31-03-2009 13:40:39
 Модель станка: 5M150 ПФЗ
 Инвентарный номер:
 Наибольший диаметр обрабатываемого колеса: 800 мм
 Настройка станка: $Z_k/Z_d = 3/1$

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ

Таблица 1

Направление вращения стола	Накопленная погрешность, угл.сек	Периодическая погрешность, угл.сек	Кинематическая погрешность, угл.сек
По часовой	26.1	13	52.2
Против часовой	49.6	11.9	84.5
Допуск: Класс Н Класс П По ГОСТ 658-89	50 32	16 10	

Класс точности: фактический «Н» (по паспорту «П»)

Выводы по результатам проверки

- При проверке станка выявлены ярко выраженные местные дефекты зубьев червячного делительного колеса стола, вызванные их повреждениями, в том числе:
 - до 15-20 угл. сек. при вращении стола по часовой стрелке;
 - до 10 -12 угл. сек. при вращении стола против часовой стрелки.
- Выявлены местные дефекты зубьев червячного делительного колеса штосселя до 12-15 угл. сек.
- Вероятно имеет место радиальное (а возможно и торцовое) биение червячного делительного колеса штосселя относительно оси вращения штосселя, связанное с погрешностями его монтажа (признаком данного дефекта является значительное отличие величин накопленной погрешности штосселя при вращениях по и против часовой стрелки).
- Возможно наличие заеданий в направляющих делительного колеса штосселя (признаком данного дефекта является наличие в спектре кинематической погрешности 2, 3, 4 и 5-й гармоник от частоты вращения штосселя).
- Вероятно имеет место заедание в упорном подшипнике делительного червяка стола, работающем при вращении стола по часовой стрелке (признаком этого является наличие в спектре кинематической погрешности 2, 3, 4 и 6-й гармоник от частоты вращения червяка).
- Возможно имеет место повышенная накопленная погрешность зубчатого колеса Z40, установленного в ветви привода штосселя, которая связана с погрешностями его изготовления и/или монтажа (признаком данного дефекта является составляющая спектра кинематической погрешности, проявляющаяся на относительной частоте вращения этого зубчатого колеса, равная 810 оборотам за оборот стола)

Проверил

Васильев А.Г.

Приложение П.7.1

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА № 1

Дата проведения измерений 31-03-2009 13:40:39
 Модель станка: 5M150 ПФЗ
 Инвентарный номер:
 Наибольший диаметр обрабатываемого колеса: 800 мм
 Настройка станка: $Z_k/Z_d = 3/1$
 Направление вращения стола: По часовой стрелке

Частоты в об. вых. вала		Вел-на Погрешности угл. с	Допуск угл. с	Наименование детали	Вал	Вид дефекта (диагноз)
Реал	Расчет					
1	1	8.5		<u>Черв. колесо Z=168</u>	<u>Вал/Сопр. вал 1/2</u>	<u>Эксцентриситет</u>
1	1	8.5		Черв. колесо Z=168	Вал/Сопр. вал 1/2	Зазоры в направляющих стола
3	3	16.2		<u>Вал7 (штоссель)</u>	<u>Вал7</u>	<u>Зазор в направляющих штосселя</u>
3	3	16.2		<u>Черв. колесо Z=90</u>	<u>Вал/Сопр. вал 7/6</u>	<u>Эксцентриситет</u>
3	3	16.2		<u>Черв. колесо Z=90</u>	<u>Вал/Сопр. вал 7/6</u>	<u>Зазоры в подшипниках черв. колеса</u>
6	6	3.6		Вал7 (штоссель)	Вал7	Зазор, перекося вала
6	6	3.6		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	<u>Зазоры в подшипниках черв. колеса</u>
9	9	2		Вал7 (штоссель)	Вал7	Зазор, перекося вала
9	9	2		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	<u>Зазоры в подшипниках черв. колеса</u>
12	12	3.9		Вал7 (штоссель)	Вал7	Зазор, перекося вала
12	12	3.9		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	<u>Зазоры в подшипниках черв. колеса</u>
15	15	1.6		Вал7 (штоссель)	Вал7	Зазор, перекося вала
15	15	1.6		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	<u>Зазоры в подшипниках черв. колеса</u>
168	168	4.1		Черв. колесо Z=168	Вал/Сопр. вал 1/2	Дефект зубьев
168	168	4.1		вал2	вал2	Зазор в подшипниках вала
168	168	4.1		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 2/1</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
168	168	4.1		зубч. колесо Z=100	Вал/Сопр. вал 2/3	Эксцентриситет

184	-	1.8		--	----	Неизвестный дефект
270	270	3.3		вал6	Вал6	Зазор в подшипниках вала
270	270	3.3		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 6/7</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
270	270	3.3		<u>Зубч. колесо Z=120</u>	<u>Вал/Сопр. вал 6/5</u>	<u>Эксцентриситет</u>
270	270	3.3		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	Дефект зубьев
336	336	2.2		Черв. колесо Z=168	Вал/Сопр. вал 1/2	Дефект зубьев
336	336	2.2		вал2	Вал2	Зазор, перекося вала
336	336	2.2		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 2/1</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
368	-	3.3		--	----	Неизвестный дефект
370	-	1.6		--	----	Неизвестный дефект
504	504	2.2		Черв. колесо Z=168	Вал/Сопр. вал 1/2	Дефект зубьев
504	504	2.2		вал2	Вал2	Зазор, перекося вала
504	504	2.2		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 2/1</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
540	540	0.9		вал6	Вал6	Зазор, перекося вала
540	540	0.9		Червяк N заходов=1	Вал/Сопр. вал 6/7	Осевое и радиальное биение
540	540	0.9		Зубч. колесо Z=120	Вал/Сопр. вал 6/5	Перекося
672	672	1.3		вал2	Вал2	Зазор, перекося вала
672	672	1.3		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 2/1</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
810	810	1.3		вал5	Вал5	Зазор в подшипниках вала
810	810	1.3		<u>Зубч. колесо Z=40</u>	<u>Вал/Сопр. вал 5/6</u>	<u>Эксцентриситет</u>
810	810	1.3		вал6	Вал6	Зазор, перекося вала
810	810	1.3		Червяк N заходов=1	Вал/Сопр. вал 6/7	Осевое и радиальное биение
1008	1008	0.3		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 2/1</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>

Угл. сек.

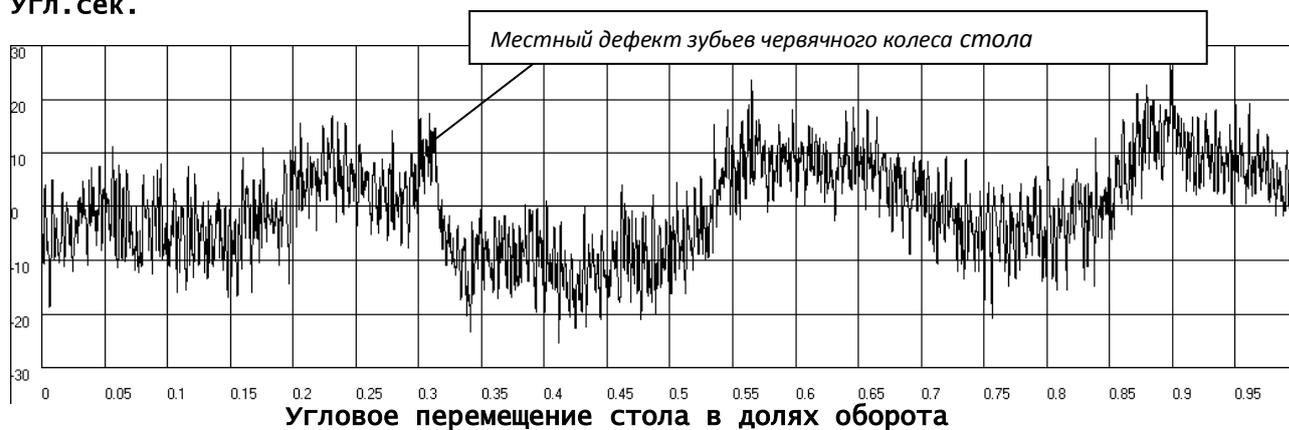


Рисунок п.7.4. График временной функции кинематической погрешности
Дата 31-03-2009 время 13:40:39 Модель 5M150 ПФЗ (по часовой стрелке)

Угл. сек



Рисунок п.7.5. Спектр кинематической погрешности
Дата 31-03-2009 время 13:40:39 Модель 5M150 ПФЗ (по часовой стрелке)

Приложение п.7.2

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА № 2

Дата проведения измерений 31-03-2009 13:27:50
 Модель станка: 5M150 ПФЗ
 Инвентарный номер:
 Наибольший диаметр обрабатываемого колеса: 800 мм
 Настройка станка: $Z_k/Z_d = 3/1$
 Направление вращения стола: Против часовой стрелки

Частоты в об. вых. вала		Вел-на Погрешн ости угл. с	Допуск угл. с	Наименование детали	Вал	Вид дефекта (диагноз)
Реал	Расчет					
1	1	7.7		<u>Черв. колесо Z=168</u>	<u>Вал/Сопр. вал 1/2</u>	<u>Эксцентриситет</u>
1	1	7.7		Черв. колесо Z=168	Вал/Сопр. вал 1/2	Зазоры в направляющих стола
3	3	38.9		Вал7 (штоссель)	Вал7	Зазор в направляющих штосселя
3	3	38.9		<u>Черв. колесо Z=90</u>	<u>Вал/Сопр. вал 7/6</u>	<u>Эксцентриситет</u>
3	3	38.9		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	Зазоры в направляющих черв. колеса
6	6	6.2		<u>Вал7 (Штоссель)</u>	<u>Вал7</u>	<u>Зазор, перекося вала</u>
6	6	6.2		<u>Черв. колесо Z=90</u>	<u>Вал/Сопр. вал 7/6</u>	<u>Зазоры в направляющих черв. колеса</u>
9	9	5.4		Вал7 (штоссель)	Вал7	Зазор, перекося вала
9	9	5.4		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	Зазоры в направляющих черв. колеса
12	12	5.2		Вал7 (штоссель)	Вал7	Зазор, перекося вала
12	12	5.2		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	Зазоры в направляющих черв. колеса
15	15	2.4		Вал7 (штоссель)	Вал7	Зазор, перекося вала
15	15	2.4		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	Зазоры в направляющих черв. колеса
168	168	1.3		Черв. колесо Z=168	Вал/Сопр. вал 1/2	Дефект зубьев
168	168	1.3		Вал2	Вал2	Зазор в подшипниках вала
168	168	1.3		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 2/1</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
184	-	1.8		--	----	Неизвестный дефект

270	270	2.4		Вал6	Вал6	Зазор в подшипниках вала
270	270	2.4		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 6/7</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
270	270	2.4		зубч. колесо Z=120	Вал/Сопр. вал 6/5	Эксцентриситет
270	270	2.4		Черв. колесо Z=90	Вал/Сопр. вал 7/6	Дефект зубьев
336	336	1.7		Черв. колесо Z=168	Вал/Сопр. вал 1/2	Дефект зубьев
336	336	1.7		Вал2	Вал2	Зазор, перекос вала
336	336	1.7		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 2/1</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
366	-	1.7		--	----	Неизвестный дефект
368	-	3.2		--	----	Неизвестный дефект
370	-	1.9		--	----	Неизвестный дефект
504	504	0.4		Вал2	Вал2	Зазор, перекос вала
504	504	0.4		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 2/1</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
672	672	2.5		Вал2	Вал2	Зазор, перекос вала
672	672	2.5		<u>Червяк N заходов=1</u>	<u>Вал/Сопр. вал 2/1</u>	<u>Осевое и радиальное биение</u>
810	810	0.3		<u>зубч. колесо Z=40</u>	<u>Вал/Сопр. вал 5/6</u>	<u>Эксцентриситет</u>
810	810	0.3		Вал6	Вал6	Зазор, перекос вала
810	810	0.3		Червяк N заходов=1	Вал/Сопр. вал 6/7	Осевое и радиальное биение



Рисунок 7.6. График временной функции кинематической погрешности
 Дата 31-03-2009 время 13:27:50 Модель 5M150 пф3(по часовой стрелке)

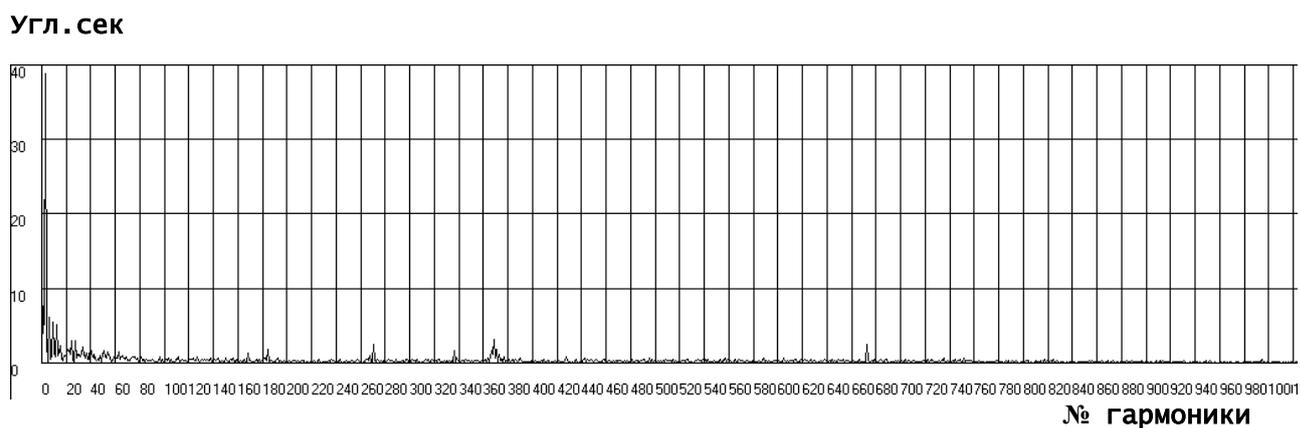


Рисунок п.7.7. Спектр кинематической погрешности
 Дата 31-03-2009 время 13:27:50 Модель 5M150 пф3(по часовой стрелке)

ПРОТОКОЛ ПРОВЕРКИ №2
кинематической точности цепи обката-деления
зубодолбежного станка
(приемо-сдаточные испытания у Заказчика)

Дата проведения измерений 13-05-2009 15:35:22
 Модель станка: 5M150 ПФЗ
 Инвентарный номер:
 Наибольший диаметр обрабатываемого колеса: 800 мм
 Настройка станка: Zk/Zд = 3/1

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ

Таблица 1

Направление вращения стола	Накопленная погрешность, угл.сек	Периодическая погрешность, угл.сек	Кинематическая погрешность, угл.сек
По часовой	16.8	9.7	28.2
Против часовой	21.5	6.7	31.5
Допуск: Класс Н Класс П По ГОСТ 658-89	50 32	16 10	

Класс точности: фактический «П» (по паспорту «П»)

Выводы по результатам проверки

1. Проведённые по рекомендациям предварительной проверки работы по замене дефектного червячного делительного колеса штоселя, замене зубчатого колеса Z40 в ветви штоселя, а также регулировке упорных подшипников червяка стола позволили повысить кинематическую точность станка до уровня, удовлетворяющего требованиям предъявляемым к станкам класса точности «П» по ГОСТ 658-89.
2. Часть дефектов, выявленных по результатам предварительной проверки, не были устранены. Поэтому при повторной проверке станка (приемо-сдаточные испытания у Заказчика) сохранились ярко выраженные местные дефекты зубьев червячного делительного колеса стола, вызванные их повреждениями, на которые было обращено внимание Изготовителя в протоколе предварительной проверки, в том числе:
 - до 15-20 угл. сек. при вращении стола по часовой стрелке;
 - до 10-12 угл. сек. при вращении стола против часовой стрелки.
 Кроме того, сохранились заедания в упорном подшипнике делительного червяка стола, работающем при вращении стола по часовой стрелке (признаком этого является наличие в спектре кинематической погрешности 2, 3, 4-й гармоник частоты вращения червяка).
3. В случае устранения этих дефектов точность станка могла бы быть повышена до уровня класса «В» (высокий класс точности).

Проверила

Аскарова Р.Р.

Приложение 8

Основные особенности и краткие технические характеристики кинематомера «Диакин-3»

1. Назначение приборного комплекса.

Приборный комплекс (кинематомер) «Диакин-3» предназначен для проверки в автоматизированном режиме кинематической точности следующих механизмов:

- редукторов различных типов (в том числе и волновых);
- различных типов зубообрабатывающих, резьбонарезных и резбошлифовальных станков;
- различных видов зубчатых и винтовых передач.

С помощью кинематомера «Диакин-3» могут определяться величины кинематической, накопленной и циклической (периодической) погрешностей механизмов, а также осуществляется диагностирование технического состояния основных звеньев их кинематических цепей.

При этом выявляются эксцентриситеты зубчатых и винтовых передач, их накопленные и циклические погрешности, местные дефекты зубьев, зазоры и перекосы, люфты при реверсе, износ и повреждения подшипников и ряд других дефектов.

В основе метода диагностирования, реализуемого в программном обеспечении прибора, лежит совместный анализ временной функции и спектра контролируемой погрешности, обеспечивающий достижение глубины диагностирования до уровня кинематического звена контролируемой цепи.

По результатам проверки на дисплее ЭВМ и принтере распечатываются протокол проверки, графики кинематической погрешности виде временной функции и спектра, а так же диагностическая таблица с перечнем потенциальных дефектов контролируемой кинематической цепи.

2. Технические данные и характеристики.

2.1. В базовом исполнении приборный комплекс «Диакин-3» обеспечивает измерение кинематической точности различных типов редукторов, зубчатых передач в сборе, а так же зубообрабатывающего оборудования (зубофрезерного, зубодолбёжного, зубошлифовального), предназначенного для обработки зубчатых колёс малых и средних модулей по следующим параметрам:

- кинематической погрешности F_{ir} ;
- накопленной погрешности F_p ;
- периодической погрешности f_t .
- мёртвого хода T_{jn} .

С учётом включаемого в комплект поставки по специальному заказу дополнительного оборудования, приборный комплекс «Диакин-3Р» имеет расширенные технические возможности и позволяет осуществлять проверку кинематической точности:

- тяжелого зубообрабатывающего оборудования высокой (класс «В») и особо высокой точности (класс «А»), а также крупногабаритных кинематических редукторов;
- различных типов винтовых передач, резьбонарезных и резбошлифовальных станков.

2.2. Количество измерительных каналов – 2;
(по структуре и техническим характеристикам каналы идентичны).

2.3. Диапазон измеряемых передаточных отношений между входным и выходным звеньями кинематической цепи - от 1/1 до 1/30000;

2.4. Диапазон измерения кинематической погрешности:

- при измерении угловых перемещений - от 0 до ± 10 угловых секунд;
6
- при измерении линейных перемещений - от 0 до ± 10 мкм.

2.5. Систематическая погрешность измерения:

2.5.1. Кинематической погрешности при измерении угловых перемещений:

$$\Delta F_{ir} = \partial D_{вых} + \partial D_{вх} / i + d_{вых} \quad (\text{угл. сек.})$$

где ΔF_{ir} - систематическая погрешность измерения кинематической погрешности, угл.сек.;

$\partial D_{вых}$ - систематическая погрешность преобразователя угловых перемещений выходного звена, угл.сек.;

$\partial D_{вх}$ - систематическая погрешность преобразователя угловых перемещений входного звена, угл.сек.;

i - передаточное отношение измеряемой кинематической цепи от входного звена к выходному;

$d_{вых}$ - дискретность отсчета преобразователя угловых перемещений выходного звена, угл.сек.;

2.5.2. Накопленной погрешности при измерении угловых перемещений:

$$\Delta F_p = \partial D_{вых} + d_{вых} \quad (\text{угл. сек.})$$

где ΔF_p - систематическая погрешность измерения накопленной погрешности, угл.сек.;

2.5.3. Периодической (циклической) погрешности:

$$\Delta f_{ir} = \partial D_{вх} / i + d_{вых} \quad (\text{угл. сек.})$$

где Δf_{ir} - систематическая погрешность измерения периодической погрешности, угл.сек.;

2.5.4. Кинематической погрешности при измерении линейных перемещений:

$$\Delta F_{ir} = \partial D_{вых} + \partial D_{вх} / i + d_{вых} \quad (\text{мкм})$$

где ΔF_{ir} - систематическая погрешность измерения кинематической погрешности, мкм.;

$\partial D_{вых}$ - систематическая погрешность преобразователя линейных перемещений выходного звена, мкм.;

$\partial D_{вх}$ - систематическая погрешность преобразователя угловых перемещений входного звена, угл.сек.;

i - передаточное отношение измеряемой кинематической цепи от входного звена к выходному;

$d_{вых}$ - дискретность отсчета преобразователя линейных перемещений выходного звена, мкм.

2.5.5. Накопленной погрешности при измерении линейных перемещений:

$$\Delta F_p = \partial D_{вых} + d_{вых} \quad (\text{мкм})$$

где ΔF_p - систематическая погрешность измерения накопленной погрешности, мкм;

2.5.6. Периодической погрешности:

$$\Delta f_{ir} = \partial D_{вх} / i + d_{вых} \quad (\text{мкм})$$

где Δf_{ir} - систематическая погрешность измерения периодической погрешности, мкм

2.6. Технические характеристики измерительных преобразователей:

2.6.1. Преобразователь угловых перемещений выходного звена (стола) ЛИР-190А:

- систематическая погрешность $\partial D_{\text{вых}}$, угл. сек. - ± 3.5 ;
- число штрихов - 9000;
- число дискрет на оборот - 1200000;
- дискретность отсчета $d_{\text{вых}}$, угл.сек. - 1.08;
- максимальная частота вращения, об/мин - 90

2.6.2. Преобразователь угловых перемещений выходного звена (стола) ЛИР-1170А:

- систематическая погрешность $\partial D_{\text{вых}}$, угл. сек. - ± 1.5 ;
- число штрихов - 18000;
- число дискрет на оборот - 3600000;
- дискретность отсчета $d_{\text{вых}}$, угл.сек. - 0.36;
- максимальная частота вращения, об/мин - 30

2.6.3. Преобразователь угловых перемещений входного звена (фрезерного шпинделя) ЛИР-350А:

- систематическая погрешность $\partial D_{\text{вх}}$, угл. сек. - ± 60 ;
- число штрихов - 1000;
- число дискрет на оборот - 4000;
- дискретность отсчета $d_{\text{вх}}$, угл.сек. - 324;
- максимальная частота вращения, об/мин - 900

2.6.4. Преобразователь угловых перемещений входного звена (фрезерного шпинделя) ЛИР-292А:

- систематическая погрешность $\partial D_{\text{вх}}$, угл. сек. - ± 15 ;
- число штрихов - 1000;
- число дискрет на оборот - 4000;
- дискретность отсчета $d_{\text{вх}}$, угл.сек. - 324;
- максимальная частота вращения, об/мин - 450

2.6.5. Преобразователь линейных перемещений ЛИР-9

- длина преобразуемого перемещения контролируемого объекта, мм - 920;
- систематическая погрешность $\partial D_{\text{вх}}$, мкм. - 6;
- дискретность отсчета $d_{\text{вх}}$, мкм. - 0.2;
- максимальная скорость перемещения при измерении, мм/мин - 1000.

2.7. Прибор предназначен для эксплуатации в помещениях при климатических условиях, соответствующих требованиям УХЛ 4.2:

- температура, °С - от +10 до +35;
- относительная влажность, % до 80;
- высота над уровнем моря, м - до 2200 м
(атмосферное давление, мм. рт. ст. - от 525 до 800)

2.8. Класс защиты прибора по ГОСТ 26104-89 -

I;

2.9. Степень защиты оболочки:

- преобразователей угловых перемещений - IP64;
- преобразователя линейных перемещений - IP53;
- ПЭВМ – IP40;
- блока измерительного – IP40.

2.10. Непрерывное время работы, ч

8;

2.11. Питание прибора:

- напряжение, В - 220(+10%, -15%);
- частота, Гц - 50(+1, -1);

- 2.12. Максимальная потребляемая мощность, ВА (не более) - 30;
- 2.13. Вес приборного комплекса с ПЭВМ без учёта оснастки для установки измерительных преобразователей, кг (не более)- 6;
- 2.14. Состав программного обеспечения:
- программа измерения кинематической точности зубчатых передач и редукторов «Диакин –Редуктор»
 - программа измерения кинематической точности зубообрабатывающих станков «Диакин-Станок»;
 - программа измерения кинематической точности винтовых передач «Диакин-Привод»;
 - программа измерения координатных перемещений «Диакин- Отсчёт».

3. Комплект поставки приборного комплекса «Диакин-3» *)

№ п/п	Наименование	Количество	Примечание
1	Блок измерительный кинематомера «Диакин-3»	1	
2	Блок питания кинематомера «Диакин-3»	1	
3	Ноутбук	1	
4	Блок питания ноутбука		
5	Кабель соединительный для подключения блока измерительного к ноутбуку	1	
6	Преобразователь угловых перемещений ЛИР350А-1000 -05-ПИ	1	
7	Преобразователь угловых перемещений ЛИР190А-300000-05-ПИ	1	
8	Преобразователь угловых перемещений ЛИР-1170А-900000-05-ПИ	1	По спецзаказу
9	Преобразователь угловых перемещений ЛИР292А-1000 -05-ПИ	1	По спецзаказу
10	Преобразователь линейных перемещений ЛИР-9-920-05-ПИ	1	По спецзаказу
11	Кабели соединительные сигнальные для подключения датчиков	2	
12	Пантограф датчика ЛИР 190А	1	
13	Пантограф датчика ЛИР 350А	1	
14	Пантограф датчика ЛИР 1170А	1	По спецзаказу
15	Пантограф датчика ЛИР 1170А	1	По спецзаказу
16	Приспособление для установки и выставки датчика ЛИР-190А	1	
17	Приспособление для установки и выставки датчика ЛИР-1170А	1	По спецзаказу
18	Приспособление для установки выставки датчика ЛИР-9	1	По спецзаказу
19	Стойка магнитная	1	По спецзаказу
20	Индикатор часового типа ц.д. 0.01 мм	1	По спецзаказу

№ п/п	Наименование	Количество	Примечание
Документация			
21	Паспорт и руководство по эксплуатации кинематомера «Диакин-3»	1	
22	Руководство пользователя ноутбука	1	
23	Программное обеспечение: <ul style="list-style-type: none"> ▪ «Диакин-Редуктор» ▪ «Диакин-Станок» ▪ «Диакин-Привод» ▪ «Диакин-Отсчёт» 	CD-диск	

*) Примечание: При необходимости повышения точности и разрешающей способности измерений комплект прибора может быть дополнен другими видами импульсных датчиков, например лазерными и/или голографическими.

4. Состав, устройство и принцип работы приборного комплекса «Диакин 3»

4.1. Структурная схема и состав комплекса.

Структурная схема комплекса «Диакин-3» приведена на рис.п.8.1.

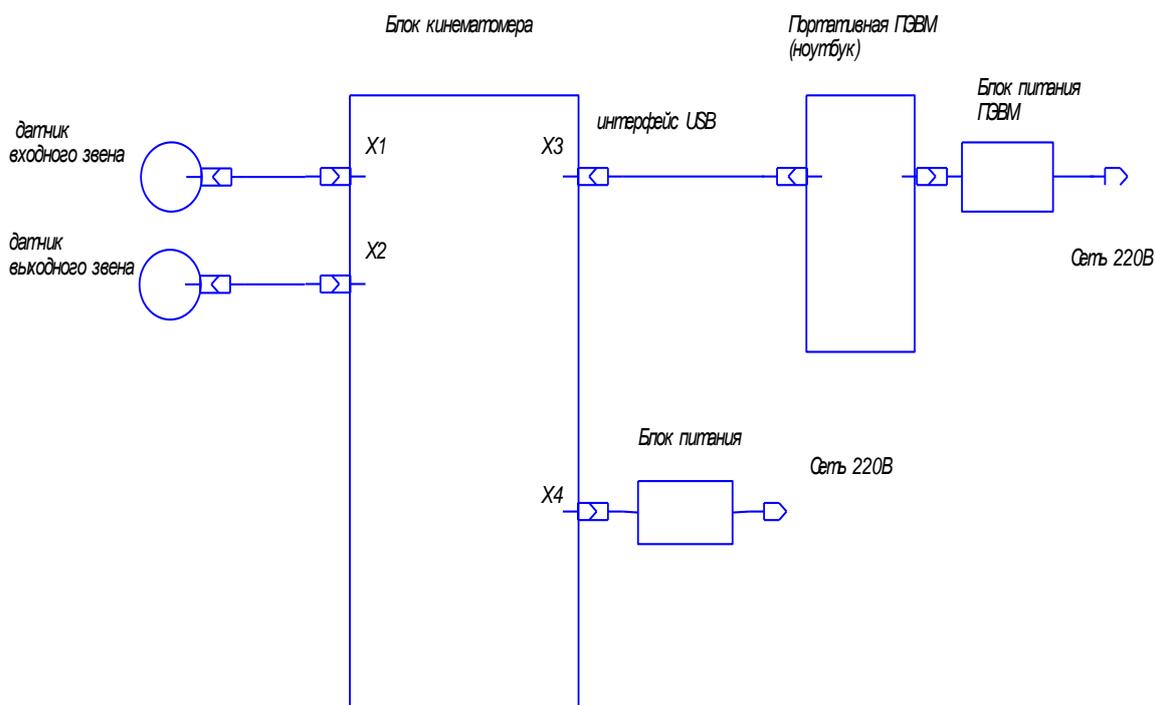


Рис.п.8.1 Структурная схема приборного комплекса "Диакин-3"

Базовый комплект комплекса состоит из блока кинематомера (измерительного блока), двух преобразователей угловых перемещений, подключаемых к блоку кинематомера при помощи соответствующих кабелей, портативной ПЭВМ (ноутбука), а также двух блоков питания.

При необходимости проверки кинематической точности винтовых передач вместо преобразователя угловых перемещений выходного звена используется преобразователь линейных перемещений.

При работе комплекса используются два импульсных преобразователя перемещения, которые с помощью механических приспособлений соединяются с конечными звеньями контролируемой кинематической цепи механизма.

Перемещение звеньев преобразуется измерительными преобразователями в электрические сигналы (последовательности импульсов).

Сигналы с преобразователей поступают на соответствующие входы блока кинематомера, в котором с помощью соответствующих аппаратных счетчиков по каждому фронту сигнала преобразователей осуществляются операции суммирования или вычитания, изменяющие общее содержимое счетчиков.

Полученные массивы отсчетных значений в соответствии с выбранным алгоритмом, учитывающим передаточное отношение контролируемой цепи, подвергаются программной обработке, в результате которой формируется необходимая измерительно-диагностическая информация, выдаваемая пользователю в виде текстовых и/или графических документов на дисплее ПЭВМ или принтере.

4.2. Устройство и работа составных частей комплекса.

4.2.1. Блок кинематомера.

Блок кинематомера выполнен на базе специализированной платы сбора данных NI 6210-USB компании National Instruments.

Он предназначен для приема импульсных сигналов TTL-уровня поступающих с выходов преобразователей перемещений инкрементного типа (энкодеров), их предварительной обработки и передачи данных в ПЭВМ.

Передача данных в персональный компьютер от блока кинематомера осуществляется через стандартный USB- порт компьютера.

Блок кинематомера определяет величину перемещения, измеренную с помощью измерительного преобразователя, путём подсчёта числа импульсов, поступающих на его входы с выходов преобразователей.

Он обеспечивает возможность выполнения двух режимов измерения, в том числе:

- измерение перемещения;
- измерение кинематической погрешности.

В режиме измерения перемещения осуществляется суммирование импульсов, поступающих с одного датчика перемещения, запоминание результата в момент, определяемый внешним событием, и передачу результата в ПК.

В режиме измерения кинематической погрешности блок кинематомера измеряет рассогласование по перемещению входного и выходного звеньев контролируемой кинематической цепи, которое представляет собой функцию кинематической погрешности, информация о которой в виде цифрового массива данных передается в ЭВМ для дальнейшей обработки.

Анализ функции кинематической погрешности, проводимый ЭВМ во временной и спектральной областях с использованием соответствующего программного обеспечения, позволяет выполнять в автоматизированном режиме диагностирование технического состояния контролируемых механизмов и выявление дефектов механических узлов оборудования.

4.2.2. Измерительные преобразователи перемещений (датчики).

В качестве измерительных преобразователей перемещения в приборном комплексе могут использоваться импульсные инкрементные фотоэлектрические датчики, например типа ЛИР (круговые и линейные), лазерные датчики линейных перемещений, а также любые другие импульсные датчики перемещения или генераторы импульсов.

Датчики, имеющие выходной сигнал TTL-уровня, подключаются непосредственно на входные разъёмы кинематомера.

Для подключения датчиков с иными характеристиками сигналов используются дополнительные согласующие преобразователи.

К блоку кинематомера могут быть подключены два типа датчиков перемещений-статические и/или динамические.

В процессе работы статические датчики формируют на своих выходах две импульсные последовательности, сдвинутые по фазе друг относительно друга на 90 град, а динамические - одну импульсную последовательность.

4.2.3. Персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ)

ПЭВМ предназначена для приема данных из блока кинематомера, их программной обработки и выдачи результатов измерений оператору в виде цифровой информации, графиков и протоколов проверки.

Обычно в качестве ЭВМ используется ноутбук, что обеспечивает необходимую мобильность комплекса.

4.3. Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) комплекса включает в себя следующие программы:

- «**Диакин-Станок**» (предназначена для измерения кинематической точности зубообрабатывающих станков);
- «**Диакин-Редуктор**» (предназначена для измерения кинематической точности редукторов и зубчатых передач в реверсивном режиме);
- «**Диакин-Привод**» (предназначена для измерения кинематической погрешности винтовых передач, в том числе цепей винтообрабатывающих и резьбошлифовальных станков).
- «**Диакин-Отсчёт**» (предназначена для измерения точности угловых и линейных координатных перемещений).

Указанное ПО позволяет осуществлять в автоматизированном режиме следующие функции:

- описание объекта диагностирования (в том числе формирование расчётной кинематической схемы и расчетного спектра потенциальных дефектов кинематической цепи);
- измерение кинематической погрешности или погрешности координатных перемещений;
- обработку результатов измерения с получением временной функции и спектра кинематической погрешности;
- обработку временной функции кинематической с целью выделения накопленной и циклической погрешностей;
- спектральный анализ временной функции кинематической погрешности;
- диагностирование дефектных звеньев-источников кинематической погрешности, выполняемое путем сопоставления расчетного и измеренного спектров;
- формирование и распечатку протокола проверки проверяемого объекта.

При необходимости базовое программное обеспечение может быть доработано с учётом конструктивных особенностей диагностируемых механизмов и индивидуальных требований Заказчика.

Более полная и подробная информация о цифровом кинематомере «Диакин-3» приведена в паспорте-руководстве по эксплуатации приборного комплекса [