

Разработка измерительного комплекса для автоматизированной настройки инструментальных наладок для станков с ЧПУ

А. В. ШУЛЕПОВ*, И. Е. ХОЛИН*, С. Н. ГЕРАСИМОВ* Д. А. ДУДАРОВ*,
А. Ю. БАЙКОВСКИЙ**, В. А. КУЛИКОВ**

* Государственный инжиниринговый центр МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия,
e-mail: avshul@yandex.ru

** ОАО «НИИИзмерения», Москва, Россия

Представлены результаты разработки комплекса для автоматизированной настройки вне станка инструментальных наладок для высокоскоростных и прецизионных обрабатывающих центров с числовым программным управлением. Приведены сведения об особенностях устройства комплекса, его возможностях и метрологических характеристиках.

Ключевые слова: числовое программное управление, настройка инструмента вне станка, оптоэлектронная измерительная система.

The results of development of domestic measuring complex for automated instrument adjustment outside the machine tool for high-speed and high-precision manufacturing centers with programmed numerical control are presented. The information on features of measuring complex and on its capabilities and metrological characteristics is provided.

Key words: programmed numerical control, instrument adjustment outside the machine tool, optoelectronic measuring system.

К параметрам геометрической точности изделий высоких технологий и деталей, входящих в состав сложных систем, предъявляются высокие требования. Внедрение и развитие технологий производства таких изделий требуют применения высокоточного и высокопроизводительного контроля как самих изделий, так и оснащения средствами измерений и настройки технологического оборудования и инструмента, которые участвуют в процессах формообразования. В первую очередь, это относится к настройке инструментальных наладок при обработке резанием на высокоскоростных и прецизионных обрабатывающих центрах с числовым программным управлением (ЧПУ) [1].

Измерение и регулирование положения режущих поверхностей инструмента являются сложными техническими и метрологическими задачами. Большое количество типов, форм и размеров режущего инструмента, высочайшие требования к точности определения и регулирования положения режущих кромок инструмента определяют необходимость разработки специальных комплексов для настройки инструмента вне станка на базе прецизионных оптоэлектронных информационно-измерительных систем (ИИС). В России комплекс подобного уровня разработан впервые.

Измерительный комплекс предназначен для решения задач измерений и настройки инструментальных наладок, применяемых в обрабатывающих центрах с ЧПУ, а именно: измерение геометрии инструмента — линейных размеров, углов и радиусов;

настройка на размер регулируемого по обрабатываемому диаметру и осевому вылету инструмента (расточные резцы);

настройка положения режущих кромок нерегулируемого инструмента (сверла, фрезы, метчики и т. д.);

измерения радиального и торцевого биений режущих кромок инструмента;

автоматический контроль износа и повреждений режущего инструмента;

сохранение в установленном на хвостовике инструмента электронном носителе параметров инструмента и результатов настройки;

передача данных о настроенном инструменте в локальные информационные сети производственного участка.

Основные метрологические характеристики комплекса

Диапазон измеряемых параметров инструмента:

максимальный радиус 150 мм
максимальный вылет 400 мм

Дискретность отсчета при измерении размеров:

линейных 0,0001 мм
угловых 2"

Основная погрешность измерений:

линейных величин, не более ± 0,001 мм
угловых величин, не более ± 2"

Диапазон измерений угловых размеров инструмента ... 0—360°

Время переналадки на заданный типоразмер инструмента, не более 30 мин

Время готовности к работе с момента включения, не более 15 мин

Комплекс представляет ИИС, построенную по типу координатно-измерительных машин с двумя линейными и одним вращательным управляемыми измерительными перемещениями. Определение (наладка) положения режущих кромок инструмента, обнаружение и измерение повреждений режущих частей выполняется при помощи бесконтактной оптоэлектронной системы визирования с цифровой видеокамерой высокого разрешения и интеллектуальной обработкой изображения в зоне визирования.

Принципиальная схема такого комплекса для настройки инструмента (наладки) вне станка показана на рис. 1. Оптоэлектронное устройство с цифровой видеокамерой 2 и осветительными системами для измерений в отраженном 3 и проходящем 4 свете смонтировано на кронштейне в форме скобы 1. Кронштейн установлен на каретке 12 вертикальной стойки и перемещается по координате Z. Стойка находится на каретке 10, которая движется по горизонтальной направляющей — координате X. Перемещения кареток измеряют линейными фотоэлектрическими измерительными системами (ИС) 11, 13. Настраиваемый инструмент 5 установлен в устройстве базирования поворотного стола 6. Прецизионное вращательное движение стола (координата C) позволяет измерять радиальные, угловые размеры инструмента, биения режущих кромок. Вращение стола осуществляется электроприводом 8, а измерения угловых перемещений — круговой фотоэлектрической системой 7. Для записи/считывания информации о настраиваемом инструменте 5 в состав комплекса входит устройство 9 для дистанционной записи на электронный носитель, установленный на хвостовике инструментальной оправки.

В системах измерительных перемещений применены сервоприводы с управлением от контроллеров Xenus XTL-230-18. Фотоэлектрические линейные и круговой измерительные преобразователи (энкодеры), измеряющие перемещения по координатам X, Z, C, включены в цепи обратной связи систем управления сервоприводами. Преобразователи линейных перемещений по осям X, Z ИС построены на базе оптической растровой шкалы RELM IN 20U1 A0230A (Renishaw), установленной на подложке из инвара, и считывающей головки. Измерения угловых перемещений поворотного стола по координате C выполняют круговым фотоэлектрическим растровым преобразователем ЛИР-3170А (Специальное конструкторское бюро измерительных систем, Россия).

В приводах линейных перемещений по координатам X, Z ИС применены сервомоторы LSH-074-1-30-320, которые под управлением контроллеров обеспечивают широкий диапазон скоростей движения, отличную управляемость при малых и ползучих скоростях. Сервомоторы оснащены эффективными электромеханическими тормозами, надежно фиксирующими подвижные элементы ИС в требуемом положении.

В приводе для вращения поворотного стола по координате C установлен синхронный двигатель RSM-V24-153*25C (ООО «Рухсервомотор», Республика Беларусь), имеющий кольцевую компоновку с большим центральным отверстием, что позволяет встраивать его в конструкции шпиндельных узлов ИС. Для фиксации углового положения поворотного стола предусмотрен электромеханический тормоз.

Разработанный комплекс позволяет выполнять измерения при настройке (наладке) инструмента в ручном и автоматизированном режимах. Подобные измерения можно провести только в дорогих аналоговых моделях некоторых зарубежных производителей, таких как ZOLLER, Mahr, DMG (Германия), PARLEC (США).

Для оперативного управления координатными перемещениями прибора в ручном режиме (оператором) при настройке инструмента, а также при создании управляющей программы для типовых измерительных циклов методом обучения системы применяется электронный блок, разработанный авторами статьи.

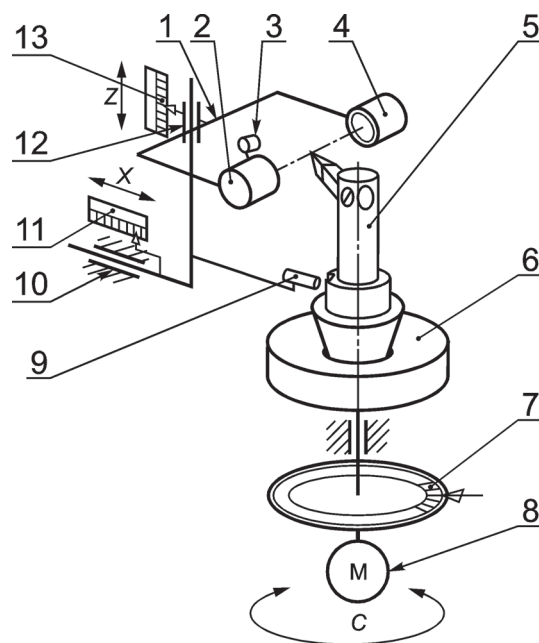


Рис. 1. Принципиальная схема комплекса для настройки инструмента вне станка:

1 — кронштейн; 2 — цифровая видеокамера; 3, 4 — осветительные системы; 5 — настраиваемый инструмент; 6 — поворотный стол; 7 — круговая фотоэлектрическая система; 8 — электропривод; 9 — устройство дистанционной записи/считывания информации; 10, 12 — каретки; 11, 13 — фотоэлектрические измерительные системы

Компьютерная система ИИС на базе IBM PC, имеющая оригинальное программно-математическое обеспечение, реализует интерфейс взаимодействия оператор—система и вместе с электронным блоком управляет работой приводов при измерении параметров инструмента в автоматизированном режиме, воспринимает и обрабатывает информацию о координатных перемещениях ИС. Двухуровневая система управления приводами позволяет перемещать ИС по координатам X, Z, C с заданными оптимальными скоростями и ускорениями в ручном и автоматизированном режимах, что обеспечивает повышение быстродействия системы и уменьшение погрешности измерений геометрии инструмента. При обработке результатов на ПК в системе предусмотрена программная компенсация влияния некоторых систематических составляющих погрешностей, возникающих в линейных и круговом преобразователях перемещений и обусловленных отклонениями от прямолинейности и ортогональности координатных перемещений.

Важнейшее устройство в составе комплекса — система обнаружения и определения положения режущих кромок настраиваемого инструмента в пространстве измерений. Эта бесконтактная оптоэлектронная система построена на принципах оптической компьютерной микроскопии с цифровой обработкой изображения. В системе используется телецентрический объектив, оснащенный цифровой видеокамерой разрешением 1600×1200 пикселей. Увеличение зоны визирования составляет $10\times$ и $20\times$ для основного режима и $40\times$ для измерений и настройки малогабаритного и микроинструмента. Система наведения работает в режиме проходящего света при измерениях положения и геометрии режу-

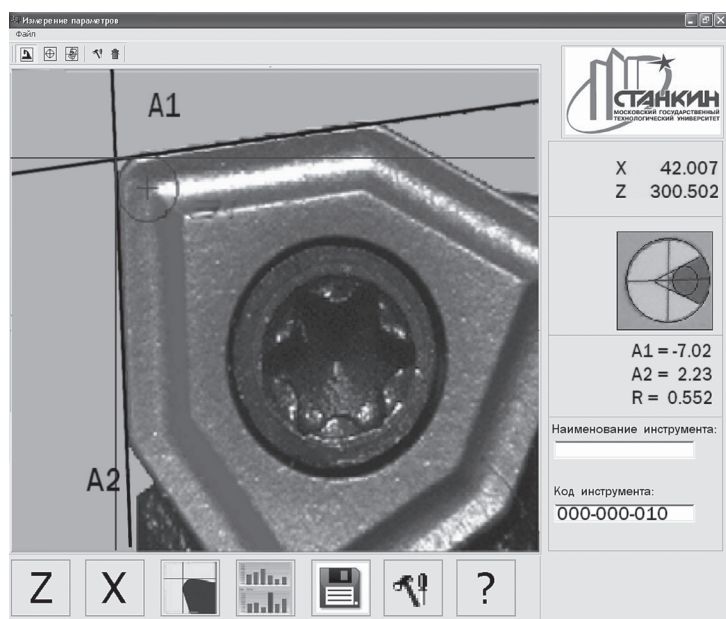


Рис. 2. Изображение пользовательского интерфейса комплекса

щей кромки по теневому изображению. При настройке (наладке) инструмента сложной конструкции и определении состояния (обнаружении повреждений и износа) режущих поверхностей предусмотрены режимы измерений в отраженном свете и при комбинации отраженного и проходящего света.

Для измерений наиболее сложных элементов инструмента и улучшения качества анализируемого изображения в оптоэлектронной системе применяют дополнительное осветительное устройство с оптоволоконным световодом.

Основные сложности при высокоточных измерениях оптическими приборами геометрических параметров объектов, в том числе и режущего инструмента, связаны с погрешностью определения границ изображения режущей кромки, вызываемые дифракцией света [2]. В результате дифракции контур изображения становится размытым, что приводит к значительным погрешностям измерений координат точек на кромках настраиваемого инструмента.

Для уменьшения влияния погрешностей наведения, вызванных дифракцией, а также обусловленных особенностями измеряемых инструментов, при проектировании комплекса были разработаны специальные, выполняемые в режиме реального времени, процедуры цифровой обработки изображения зоны наведения системы на кромку инструмента. Суть этих процедур заключается в анализе дифракционной картины в зоне наведения на кромку, нахождении точек цифрового изображения (пикселей), принадлежащих краю теневого изображения, на основе решения обратной задачи математической оптики и определения координат этих точек в системе координат X, Z, C комплекса. По этим координатам методами аналитической геометрии вычисляют искомые параметры настройки и геометрии инструмента. Указанные методы уменьшения влияния погрешности от дифракции прошли апробацию и их успешно применяют при построении оптических компьютеризированных микроскопов с цифровой обработкой изображения [3, 4].

В окне пользовательского интерфейса (рис. 2) на дисплее комплекса отображаются видеоизображение зоны на-

ведения, кнопки выбора режимов, управления процессом измерения, настройки интерфейса, координаты измеренных точек режущих кромок, определяемые при настройке инструмента, и измеренные параметры геометрии: углы в плане и радиус при вершине. Разработанное авторами оригинальное программное обеспечение зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ № 2013611730 от 04.02.2013 г.

При разработке комплекса значительное внимание уделено выбору конструктивных решений базовых элементов и исполнительных устройств, от которых зависит достижение требуемой точности измерений режущего инструмента при настройке.

Несущая механическая система должна обеспечивать прецизионное перемещение и позиционирование оптоэлектронной системы для определения положения режущей кромки контролируемого инструмента в пространстве измерений комплекса. При разработке применен модульный принцип конструирования. Так, узлы кареток для линейных перемещений по координатным осям X, Z имеют однотипную компоновку и комплектацию и отличаются только габаритными размерами и диапазонами перемещений. В конструкции узлов направляющих прямолинейных перемещений по координатам X, Z использованы рельсовые направляющие качения Bosch Rexroth (Германия). Движение кареток осуществляли при помощи прецизионных модулей для преобразования вращательного перемещения в линейное с беззазорной шарико-винтовой передачей. Применение направляющих и механизмов приводов с трением качения обеспечило высокую плавность перемещения кареток и управляемость на нулевых скоростях.

Диапазоны контролируемых перемещений оптоэлектронной системы по координатам составляют X — 230 мм, Z — 420 мм.

Узлы перемещений по координатам X, Z закрыты кожухами и защитными гофрированными чехлами. Поворотный стол с устройством зажима инструмента установлен на прецизионный шпиндель с опорами на трении качения. Системы регулировок позволяют выставить ось вращения шпинделя параллельно координатной оси Z. Дисплей, компьютер, клавиатура, пульт электронного блока управления приводами, принтер расположены на выдвижной поворотной консоли.

Выводы. Специализированное измерительное оборудование для настройки инструмента позволяет значительно повысить качество продукции, сократить время изготовления деталей, повысить надежность процессов, оборудования и инструмента при использовании в прецизионных обрабатывающих центрах с ЧПУ на машиностроительных предприятиях авиастроительного, судостроительного, ракетно-космического и атомного комплексов. Потребность в таком измерительном оборудовании достаточно велика, стоимость зарубежных аналогов с набором всех опций и программным обеспечением превышает стоимость некоторых станков с ЧПУ. Первая отечественная разработка автоматизированного комплекса для настройки (наладки) инструмента позволит уменьшить зависимость от импорта.

Л и т е р а т у р а

1. Grigoriev S. N., Kutin A. A. Innovative development of high-tech manufacturing on the basis of computer integrated systems // Automation and modern technologies. 2011. N 11. P. 82—89.

2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
3. Телешевский В. И., Шулепов А. В., Красюк О. Ю. Компьютеризация измерительных микроскопов с цифровым анализом изображений // Измерительная техника. 2006. № 8. С. 39—42; Teleshevsky V. I., Shulepov A. V., Krasnyuk O. Yu. Computerization of measuring microscopes with digital analysis of images // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 8. P. 797—802.

4. Телешевский В. И., Шулепов А. В., Роздина Е. М. Метод интеллектуальной компьютерной микроскопии при измерении линейных и угловых размеров изделий // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 3—6; Teleshevskii V. I., Shulepov A. V., Rozdina E. M. Smart computer microscopy for measurement of linear and angular dimensions of work pieces // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 8. P. 853—858.

Дата принятия 26.08.2013 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

621.317.76

Применение фильтра Калмана для измерений частот высокостабильных генераторов по сигналам космических навигационных систем

Г. П. ПАШЕВ

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»
им. А. П. Горшкова, Н. Новгород, Россия, e-mail: rvarz_asu@kvarz.com

Рассмотрены особенности применения фильтра Калмана для измерений отклонений частот высокостабильных генераторов и синхронизации по радиосигналам космических навигационных систем. Приведены оценки погрешностей работы фильтра.

Ключевые слова: фильтр Калмана, высокостабильные генераторы, нестабильность частоты, синхронизация, космические навигационные системы.

The application of Kalman filter for measurements of frequency deviation and synchronization of high-stability generators by radio signals of space navigation systems have been considered. The estimation of filter operation errors is presented.

Key words: Kalman filter, high-stability generators, frequency instability, synchronization, space navigation systems.

В [1, 2] исследовано применение цифровых фильтров с прямоугольной импульсной характеристикой для измерений отклонений частот выходных сигналов высокостабильных генераторов — квантовых и кварцевых стандартов частоты (КСЧ). Такие фильтры требуют большой оперативной памяти вычислительных устройств и наиболее приемлемы в эталонах, где ведется постоянное наблюдение за частотой и шкалой времени. В лабораторных и портативных приборах лучше использовать фильтры на основе рекуррентных алгоритмов, более экономичных по оперативной памяти. Наибольший интерес представляют фильтры Калмана, обеспечивающие минимальную случайную погрешность измерения входного сигнала в присутствии внешних помех. Ниже рассмотрено применение фильтра Калмана для измерений отклонений частот КСЧ и синхронизации по радиосигналам космических навигационных систем (КНС).

Математическую модель отклонения частоты выходного сигнала КСЧ на дискретных моментах времени можно представить в виде рекуррентного уравнения

$$x_k = x_{k-1} + \alpha + y_{k-1},$$

где $x_k = \frac{1}{T} \int_{(k-1)T}^{kT} v(t) dt$; $k = 0, 1, 2, \dots$; T — период цифровой последовательности x_k ; $v(t)$ — мгновенное относительное случайное отклонение (шум) частоты сигнала КСЧ; α — постоянное относительное отклонение частоты КСЧ; y_k — случайная составляющая разности $x_k - x_{k-1}$.

Дисперсия величины y_k равна удвоенной дисперсии двухвыборочного случайного относительного отклонения частоты КСЧ (дисперсии Аллана) $\sigma_y^2(T, T)$ [3, 4]. На рис. 1 показаны функции коэффициентов корреляции $R(k)$ последовательности y_k для наиболее характерных видов шумов частоты сигнала КСЧ: белого, фликера и случайных блужданий. Из рис. 1 следует, что зависимости $R(k)$ быстро стремятся к нулю. Поэтому приближенно можно полагать величины y_k некоррелированными, что служит необходимым условием в теории фильтра Калмана.