

значение гиромангнитного отношения соответствующего ядра будет в очередной раз уточнено (такая коррекция в тесламетре Ш1-9 не предусмотрена).

Структурная схема счетчика-делителя частоты с произвольно устанавливаемым коэффициентом деления (пересчетного устройства) изображена на Рис. 2. Шести или семиразрядный двоично-десятичный суммирующий счетчик (желательно синхронный, для уменьшения времени установления) может быть собран, например, на микросхемах ТТЛ серии 1533. Выходы

1,2,4,8 каждого десятичного разряда подключаются к соответствующим входам

программного переключателя типа ПП8-1(А), ПП8-5(А), или подобным, через диоды, как показано на Рис. 2. Выходы переключателей объединяются и через резистор 1 кОм подключаются к напряжению питания микросхем +5В. Эти переключатели выполняют функцию дешифратора, на котором устанавливается необходимый коэффициент деления счетчика. Когда количество импульсов, поданных на вход счетчика, достигнет установленного на переключателях числа, на выходе дешифратора появится высокий логический уровень, и выходным импульсом с одновибратора счетчик принудительно сбрасывается в начальное нулевое состояние, после чего процесс повторяется.

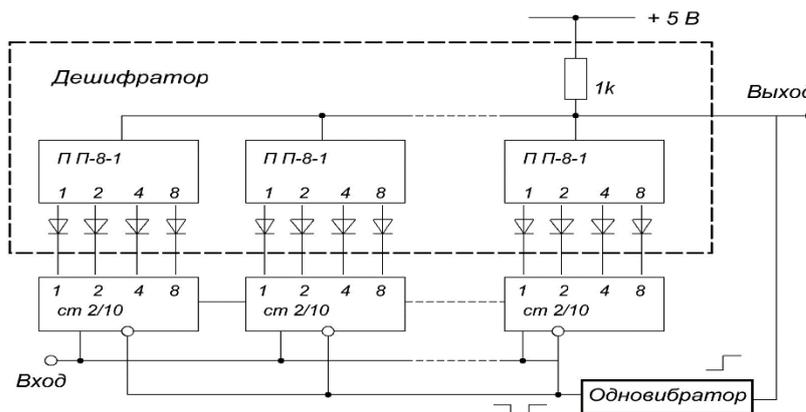


Рисунок 2 – Структурная схема счётчика пересчетного устройства



Рис. 3. Внешний вид приставки

Таким образом, возможна ручная установка (и визуальный контроль) произвольного коэффициента деления. Внешний вид приставки (пересчетного устройства) показан на Рис. 3.

Изготовление и использование пересчетного устройства целесообразно при необходимости частых и многочисленных измерений. Подобное специализированное устройство успешно работает в составе Национального эталона единицы магнитной индукции постоянного магнитного поля Тесла в диапазоне (0,05 ÷ 2) Тл для выполнения функций Государственной метрологической службы.

УДК 531.717

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ОБЪЕМНОЙ ПОГРЕШНОСТИ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Иванов В.В.<sup>1</sup>, Яковишин А.С.<sup>1</sup>, Захаров О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина  
Саратов, Российская Федерация

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
Самара, Российская Федерация

В настоящее время координатно-измерительные машины (КИМ) широко применяются в промышленности, в первую очередь на предприятиях авиационно-космической отрасли и оборонно-промышленного комплекса. С их

помощью решаются разнообразные задачи контроля размеров, формы и расположения как простых, так и сложных поверхностей деталей в лабораторных или цеховых условиях.

Погрешность координатного измерения зависит от исходной погрешности КИМ, указанной в спецификации, точности калибровки датчика касания, условий проведения измерений, состояния КИМ в процессе эксплуатации, а также алгоритмов обработки результатов контроля [1, 2]. При этом некоторые погрешности можно отнести к детерминированным, другие же к статистическим. Например, погрешность срабатывания датчика касания считается случайной, а погрешность виртуального базирования (совмещения систем координат детали и КИМ) будет систематической.

Наиболее полной комплексной оценкой КИМ следует назвать объемную погрешность, представляющую собой совокупность геометрической разности между номинальным и действительным положением измерительного щупа во всем рабочем пространстве КИМ. Следует выделить два подхода к оценке объемной погрешности КИМ: калибровка и оценка эффективности (производительности). При калибровке измеряются составляющие погрешности, вносимые отдельными узлами КИМ. Для отдельных узлов могут быть использованы данные из спецификации СММА (Ассоциация производителей координатно-измерительных машин). К ним относят: погрешность измерения линейных координатных перемещений; отклонение от прямолинейности координатных перемещений; отклонение от взаимной перпендикулярности координатных перемещений; угловые колебания подвижных узлов координатных перемещений; погрешности измерительной головки. Также спецификация описывает окончательные меры для установления общей погрешности измерений. Объемную погрешность можно рассчитать, суммируя геометрически составляющие погрешности, например, по методикам [3-5]. Данная методика для получения надежных статистических данных является трудоемкой и дорогостоящей, так как требует применения лазерных интерферометров. Поэтому она преимущественно применяется производителями КИМ. Результаты калибровки используют для составления карты погрешностей и их программной компенсации, а также анализа погрешностей узлов и элементов КИМ для дальнейшего исправления или совершенствования.

Для оценки эффективности КИМ используют различные эталоны (наборы концевых мер, сфера, плита со сферами и некоторые другие [3, 4]). Процедура оценки определена международным стандартом EN ISO 10360. Максимально допустимая погрешность (MPE) при измерении длины, согласно EN ISO 10360-2

$$E_{MPE} = A + L/K \leq B ,$$

где  $A$  – константа, установленная производителем, мкм;  $K$  – безразмерная константа, установленная производителем;

$L$  – измеренная длина, мм;  $B$  – верхняя предельная величина погрешности, мкм.

Рекомендации по оценке эффективности КИМ основаны на выборке измерения длины измерительного прибора для определения того, соответствует ли его точность заявленной максимальной допустимой ошибке измерения изготовителя. Тесты позволяют сделать только заявления об общей возможности измерения длины. Это ограничение связано со сложным способом суммирования ошибок в КИМ. Поэтому неопределенность измерения выборочной длины не может считаться репрезентативной для всех возможных задач измерения, которые КИМ способна выполнять.

Оба метода не исключают один другого, а дополняют. При производстве КИМ проверяют обоими методами. В период эксплуатации поэлементным методом КИМ проверяется обычно один раз в год, а для выявления причин потери точности проводится комплексная проверка с периодичностью в месяц.

Таким образом, построение карты объемной погрешности КИМ дает наиболее полную картину (рис. 1). Вместе с тем интерпретация полученных результатов является мало освещенной в известной литературе задачей. Основной подход заключается в компенсации систематической погрешности. На практике встречаются и другие задачи, например, сравнение эффективности двух КИМ при условии, что максимальная погрешность у обоих находится в допустимых пределах.

Для возможности оценки объемной погрешности КИМ предлагается следующий статистический критерий:

$$K = k_1 \frac{n_1}{n} + k_2 \frac{n_2}{n} ,$$

где  $n$  – общее число точек измеренного пространства;  $n_1$  – число точек с погрешностью, превышающей  $3\sigma$ ;  $n_2$  – число точек с погрешностью, превышающей  $2\sigma$ ;  $k_1, k_2$  – весовые коэффициенты.

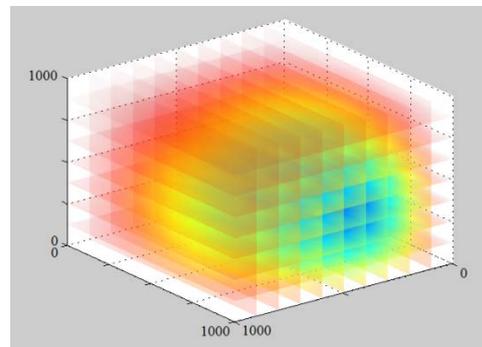


Рисунок 1 – Пример объемной погрешности КИМ

Данный критерий показывает, сколько точек рабочего пространства КИМ имеют погрешности, значительно отличающихся от среднего значения

в выборке. Чем больше значение критерия, тем ниже эффективность КИМ при условии, что все погрешности не превышают установленную производителем максимальную погрешность. Наличие точек с погрешностью, превышающей  $3\sigma$ , свидетельствует о наличии погрешностей изготовления или сборки узлов КИМ, компенсировать которые систематической составляющей будет затруднительно. Пример иллюстрации погрешности вдоль координатной оси дан на рис. 2.

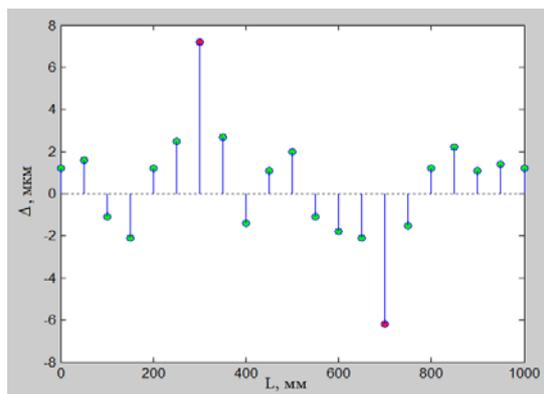


Рисунок 2 – Пример погрешности КИМ по координатной оси

Назначение весовых коэффициентов проводится в зависимости от габаритных размеров КИМ, решаемых измерительных задач и условий измерения. Целесообразно выбирать  $k_2 = (5-10)k_1$ . Критерий может быть использован для сравнения эффективности двух КИМ при прочих равных условиях.

Таким образом, научно обоснован статистический критерий для оценки объемной погрешности КИМ, представляющий собой взвешенную сумму отношения числа точек, в которых погрешность превышает соответственно  $3\sigma$  и  $2\sigma$ , к общему числу контрольных точек рабочего пространства КИМ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10204).

1. Кононогов С.А. Концепция обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы / С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко, С.Ю. Золотаревский // Приборы. – 2008. – № 3. – С. 1–13.
2. Набока Е.В. Анализ погрешностей измерений на координатно-измерительных машинах / Е.В. Набока, В.В. Лысюк // Вестник НТУ «ХПИ» Технології в машинобудуванні: сборник научных трудов. – 2010. – С. 84–88.
3. Суслин В.П. Методика объемной компенсации систематических погрешностей координатно-измерительных машин на основании измерения плиты со сферами / В.П. Суслин, А.В. Джунковский // Исследовано в России. – 2006. – С. 2211–2218.
4. Серков Н.А. Модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатного станка / Н.А. Серков // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2011. – № 3. – С. 68–78.
5. Телешевский В.И. Лазерная коррекция геометрических погрешностей многокоординатных систем с программным управлением / В.И. Телешевский, В.А. Соколов // Измерительная техника. – 2012. – № 5. С. 33–37.

УДК 621.316.722.1(045)(476)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Валенда А.Г., Волкодатов А.А., Прусаков А.К., Ярмлович М.А.

Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь

### Введение

В настоящее время высоковольтные технологии имеют самый широкий спектр применения. Огромное количество энергии передаются в Республике Беларусь по государственным перетокам напряжением 110, 220, 330 и 750 кВ и высоковольтным линиям электропередачи. Также высокие напряжения используются в медицине, транспорте, промышленности, при проведении научных исследований.

### Особенности высоковольтных измерений

Особенностью высоковольтных измерений является использование выносных масштабных преобразователей для понижения измеряемого напряжения до величин, удобных и более безопасных для измерений.

Таким образом, существует отдельный класс средств измерений – масштабные преобразователи высокого напряжения переменного и постоянного тока в напряжение величиной не более 1000 В. К таким масштабным преобразователям относятся электромагнитные и емкостные трансформаторы напряжения, резистивные и резистивно-емкостные делители напряжения.

Для осуществления метрологического контроля киловольтметров и высоковольтных масштабных преобразователей служит созданная в БелГИМ высоковольтная лаборатория

### Состав высоковольтного источника

Основной составной частью высоковольтной лаборатории является регулируемый высоковольтный источник напряжения переменного тока до 150 кВ, включающий в себя