

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕДАЧ В СБОРЕ

*Могилевский Государственный технический университет
Могилев, Беларусь*

Контроль кинематической погрешности зубчатых колес производится на заключительной стадии технологического процесса их изготовления. С этой целью на промышленных предприятиях используются приборы типа БВ-5053 [1]. Контроль кинематической точности при этом осуществляется путем сопоставления углов поворота ведомого колеса с углами поворота ведущего, эталонного колеса, согласно формуле:

$$F_R = \left(\varphi_R - \frac{2\pi}{N} kU \right) r, \quad (1)$$

где φ_R – действительный угол поворота ведомого колеса,

N – число угловых отсчетов за один оборот ведущего колеса,

k – числа, равные 0, 1, 2, ..., N ,

r – радиус, на котором определяется кинематическая погрешность,

U – передаточное отношение передачи.

К недостаткам этого метода относятся как низкая производительность, так и отсутствие возможности определения кинематической погрешности передачи в сборе. Другим существенным недостатком таких приборов является тот факт, что контроль кинематической погрешности производится в статических условиях, когда ведущее колесо поворачивается на целое число угловых шагов k , после чего определяется действительный угол поворота ведомого колеса φ_k и т.д. до тех пор, пока ведомое колесо не совершит полный поворот. Однако в реальных условиях эксплуатации колеса могут вращаться с высокими окружными скоростями, что может привести как к демпфированию высокочастотных составляющих кинематической погрешности, так и к их усилению за счет динамических процессов пересопряжения элементов зацепления (рис. 1). В этой связи кинематическая точность передачи в статических условиях может существенно отличаться от ее кинематической точности в динамических условиях, а ее оценка с помощью приборов типа БВ не дает возможности оценить это отличие.

Еще одним недостатком упомянутых приборов является наличие эталонного колеса, и, как следствие, невозможность контроля кинематической погрешности передач, имеющих зацепление, отличное от зубчатого [2].



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Сигналы и спектр кинематической погрешности.

Упомянутых недостатков можно избежать, если оценку кинематической погрешности вести на специальной автоматизированной на базе ПЭВМ установке. При этом на ведомом валу испытуемой передачи устанавливается стандартный преобразователь угловых перемещений типа ВЕ 178А, снабженный оптическим формирователем импульсов с числом отчетов за оборот $N = 2500$. Этим преобразователем при вращении ведомого вала формируется последовательность прямоугольных импульсов равной амплитуды, на различной скважности в силу неравномерности частоты вращения вала, связанной с наличием кинематических погрешностей. Поскольку кинематические погрешности передачи интегрируются за оборот колеса, мерой неравномерности движения вала является отклонение частоты следования импульсов от ее среднего значения, и, таким образом, кинематическая погрешность передачи может быть оценена по формуле

$$F = \left(t_R - \frac{2\pi}{N\omega} R \right) \cdot \omega r, \quad (2)$$

где t_R – время, соответствующее началу фронта R-го импульса,
 ω – угловая скорость вращения вала.

Формула (2) с учетом средней длительности импульсов t_{cp} может быть приведена к более удобному для расчетов виду:

$$F = (t_R - R t_{cp}) \cdot \omega r \quad (3)$$

Данная формула позволяет корректно оценить кинематическую погрешность передачи в том случае, если $\omega = \text{const}$. Поэтому на ведущем валу передачи (на валу приводного электродвигателя) полезно установить инерционную массу, обеспечивающую строгую равномерность вращения ведущего вала исследуемой передачи.

Последовательность импульсов, формируемая преобразователем угловых перемещений (рис. 1, а), вводится в ПЭВМ с помощью информационно-измерительной системы, выполненной в виде платы расширения, вставленной в стандартный слот ПЭВМ. При этом информация с преобразователя фиксируется в ASCII-файле в виде таблицы «Напряжение–время». Учитывая тот факт, что напряжение от преобразователя в большей или меньшей степени искажено шумами, производится дискретное преобразование длительностей импульсов по принципу аналого-цифрового преобразования относительно среднего уровня. Затем автоматически рассчитывается кинематическая погрешность передачи согласно формуле (3), с погрешности, не превышающей 4–8 угловых минут (рис. 1, б). Учитывая наличие собственных шумов механизма, связанных с ударами, вибрациями, для повышения достоверности исследований производится упрощенная процедура фильтрации высокочастотных шумовых составляющих сигнала с использованием экспоненциального сглаживания [3]:

$$F'_R = \alpha F_R + (1 - \alpha) F_{R-1} \quad (4)$$

Выделенный низкочастотный тренд кинематической погрешности рассматривается как ее оценка (рис. 1, в). Эксперименты показали, что при использовании преобразователя ВЕ 178А наиболее целесообразно применять показатель фильтрации $\alpha = 0,1$ для отделения высокочастотной области, $\alpha = 0,06$ – для частичного сглаживания области средней частоты спектра и $\alpha = 0,02$ для глубокой фильтрации средне- и высокочастотной областей.

По команде оператора кинематическая погрешность представляется в виде дискретного или сплошного спектра (рис. 1, г). После визуального анализа его структуры оператор может выделить из спектра резонансы (гармонические ряды) путем кепстрального анализа, построить автокорреляционную функцию, а также выполнить в автоматическом режиме ряд других математических процедур, позволяющих получить исчерпывающую информацию о кинематической погрешности.

Использование описанных возможностей информационной системы также позволяет обоснованно подойти и к вопросу управления параметрами технологического процесса для повышения точности изготовления передач. Кинематический анализ механизма, а также частотное представление его кинематической погрешности в форме амплитудного спектра дают возможность привести в соответствие составляющие кинематической погрешности и причины вызывающие их появление. Эту связь можно, по-видимому, определить двумя путями. Первый из них – построение математической модели, связывающей геометрические погрешности элементов механизма с кинематической погрешностью.

Анализируя полученную кинематическую погрешность реальной передачи на основе такой модели, можно определить источники погрешности и принять решение об изменении параметров технологического процесса с целью компенсации этих погрешностей. Второй путь – и он, по-видимому, является наиболее перспективным – построение корреляционных связей между наблюдаемыми погрешностями и их предполагаемыми источниками на основе прямых наблюдений. Это позволяет избежать сложностей, связанных с построением математической модели и ее интерпретацией.

Возможен также комбинированный подход, когда по результатам прямых наблюдений строятся упрощенные математические модели.

Другим важным требованием к исследованию кинематической точности сложного механизма является необходимость его исследования в целом, т.е. с учетом его системности. Дифференцированный, поэлементный контроль механизма не всегда дает адекватную характеристику его состояния. Например, в сложных механизмах, погрешности изготовления отдельных элементов могут взаимно компенсироваться или наоборот, усиливать друг друга, и поэтому состояние элементов только косвенно характеризует состояние конструкции. С другой стороны, состояние конструкции позволяет точно определить состоя-

ние ее элементов как степень соответствия нормальному функционированию всей конструкции в целом.

Так, на рис. 1, г представлен дискретный спектр кинематической погрешности роликковой передачи с эксцентриковым механизмом (передаточное отношение $U = 14$). В спектре четко выражены гармоники с номерами 1, 13, 14, 28. Так, гармоника 1 связана с погрешностями, проявляющимися однократно за один оборот ведомого вала, и поэтому характеризует его состояние. Гармоника 13 равна числу периодов многопериодной дорожки, формирующей вращение ведомого вала.

Гармоника 14 соответствует передаточному отношению и характеризует погрешности ведущего звена механизма. Наличие в спектре механизма двух близких по частоте амплитуд приводит к появлению суммы двух элементарных колебаний, имеющих вид амплитудно-модулированных колебаний (биений), что отчетливо видно из рис. 1, в. Наблюдается также сопутствующее явление расщепления спектра (появление в спектре боковых частот).

Это позволяет сделать вывод о том, что данная конструкция передачи, включающая в себя конструктивно источники колебаний с близкими частотами (частота вращения ведущего вала или число сателлитов и число периодов дорожки), не является оптимальной с точки зрения обеспечения минимального значения наибольшей кинематической погрешности. Это связано с тем, что для биений наибольшая их амплитуда равна арифметической сумме амплитуд составляющих колебаний, в то время как при сложении двух колебаний с различными фазами суммарная амплитуда не намного превышает амплитуду наибольшего слагаемого. Поэтому для данного типа передач верны эмпирические формулы:

$$F_{\text{наиб}} \approx 2(A_{13} + A_{14}), \quad (5)$$

$$F_{\text{наиб}} \approx 2(A_1 + A_{13} + A_{14}). \quad (6)$$

Следовательно данный вид обработки многопериодной дорожки, по-видимому, не может обеспечить повышение кинематической точности передачи, и необходимо изменить параметры технологического процесса (например, уменьшить силы резания), чтобы впоследствии получить более точную передачу.

Амплитуда основных гармонических составляющих имеют высокую информативность вследствие того, что они некоррелированы и поэтому могут рассматриваться как независимые величины. Так, по результатам исследований передачи были получены линейные уравнения регрессии, связывающие амплитуды основных гармоник, которые показывают, что вследствие низких значений коэффициентов корреляции они практически независимы:

$$A_{13} = 100,4 + 0,27A_1, \quad r = 0,13.$$

$$A_{28} = 12,76 + 0,048A_1, \quad r = 0,22.$$

Таким образом, спектральный анализ кинематической погрешности позволяет разделять погрешности деталей и оценивать состояние элементов зацепления. На этой основе появляется возможность адаптивного управления параметрами технологического процесса изготовления передач с целью обеспечения наименьших значений их кинематической погрешности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по производственному контролю в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1974. – 676 с. 2. Ионак В.Ф. Приборы кинематического контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с. 3. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. – М.: Сов. радио, 1975. – 400 с.

УДК 621.9

Е. Э. Фельдштейн

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В КОНТРОЛЕ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ

*Политехника Зеленогурска
Зелена Гура, Польша*

Высокая стоимость современного машиностроительного производства способствует широкому использованию безлюдных технологий. Одним из факторов, определяющих дальнейшее развитие таких технологий, является автоматический контроль режущих инструментов с точки зрения возможности их дальнейшей работы. В настоящее время используются следующие виды контроля [1]:

- выключение (наиболее простой и радикальный способ);
- изменение управляющей программы (на станках с ЧПУ);
- коррекционные перемещения инструмента;
- замена работающей вершины инструмента;
- изменение подачи или частоты вращения шпинделя (на станках с адаптивным управлением);
- замена заготовки, непригодной для обработки.

Наиболее эластичным направлением в контроле режущих инструментов является их мониторинг (непрерывный контроль). При этом обеспечивается диагностика состояния инструмента (износ, в том числе катастрофический, предельная стойкость), формирования стружки, возникновения колебаний и т.д. Возмож-