

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 531.717:621.923

Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, О.В. Захаров

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Рассмотрены особенности гармонического анализа профилей прецизионных деталей при формообразовании и измерении. Исследована методическая погрешность измерения, обусловленная наличием эксцентриситета центра базовой окружности и начала измерительной системы координат. Предложен метод обработки результатов измерений на основе искусственных нейронных сетей, позволяющий установить взаимосвязь колебаний в технологической системе и геометрических погрешностей формообразования.

B.M. Brzhozovskiy, M.B. Brovkova, O.V. Zakharov

HARMONIC ANALYSIS IN RESEARCH OF PROCESSES OF FORMSHAPING AND MEASUREMENTS OF PRECISION PARTS

The peculiarities of harmonic analysis of profiles of precision parts at formshaping and measurements are studied here. Methodical errors of measurements depended on of availability of excentersystem of the center of the basic circle and the beginning of the measuring system a method of treatment of measurements results on the base of artificial neuron nets is proposed in this article and allows to determine the interrelationship of waves in a technological system and geometric errors of formshaping.

Анализ формообразования и измерения детали требует, с одной стороны, единообразной математической формализации, а с другой стороны, учета особенностей каждого из процессов. Только в этом случае возможно выявление периодических погрешностей геометрии детали и установление их связи с формообразующими факторами для управления технологическим процессом. В статье рассмотрены новые подходы к решению данной проблемы, учитывающие наличие эксцентриситета центра средней окружности профиля детали и начала координат при гармоническом анализе, а также позволяющие оценивать параметры качества детали по колебаниям в технологической системе.

Математические модели формообразования на операциях бесцентрового шлифования и суперфиниширования [1,2] построены на исходном описании геометрии детали с учетом периодических отклонений формы в виде тригонометрического полинома:

$$r_1(\varphi) = r_0 + \sum_{i=2}^p a_i \cos(i\varphi - \psi_i) = r_0 + \sum_{i=2}^p (b_i \cos i\varphi + c_i \sin i\varphi), \quad (1)$$

где r_0 – радиус средней окружности профиля детали; a_i, ψ_i – амплитуда и начальная фаза i -й гармоники; b_i, c_i – косинусный и синусный коэффициенты i -й гармоники; p – максимальное число гармоник.

Моделирование процесса формообразования с учетом базирования, изменения натягов в технологической системе, съема припуска и т.д. в подавляющем большинстве случаев приводит к численным решениям, в результате которых профиль детали предстает дискретно заданным [2]. В связи с этим возникает необходимость вновь найти аналитический эквивалент профиля, причем неизвестно также его положение относительно исходной системы координат.

Анализ круглограммы имеет своей целью, во-первых, численно оценить показатели, регламентированные стандартом (отклонение от круглости), а во-вторых, выявить составляющие погрешности для установления причин их появления в процессе формообразования или исследования работы детали в сопряжении при эксплуатации. Решение первой из указанных задач при выполнении ряда условий известно [3,4,5], а решение второй задачи имеет ряд особенностей, в полной мере не нашедших отражение в литературе.

При измерении профиля поперечного сечения деталей используются следующие методы [4]: радиусного измерения на кругломерах; координатного измерения на координатно-измерительных машинах и разностного измерения на призмах и измерительных головках малых линейных перемещений. В качестве базы при измерении отклонения от круглости в стандартах различных стран рекомендуются средняя окружность, прилегающая окружность и зона минимальной ширины. Наиболее широкое применение для анализа круглограммы получила средняя окружность.

Повышение точности измерения при радиусном и координатном методах достигается минимизацией эксцентриситета центра средней окружности профиля детали и центра измерительной системы. Поэтому в первом случае деталь предварительно центрируют, а во втором – математически определяют положение центра средней окружности профиля детали. При этом использование формул Спрегга [5] для расчета отклонения от круглости дает хорошие результаты по точности. Метод разностного измерения основан на эффекте минимизации перемещений центра средней окружности профиля детали при вращении относительно измерительного датчика.

Таким образом, одну из актуальных задач при анализе формообразования и измерения представляет нахождение тригонометрического полинома, описывающего дискретно заданный профиль детали. Известным решением данной задачи является гармонический анализ [6]. Однако корректность его применения обусловлена совпадением центра средней окружности профиля детали и начала системы координат при гармоническом анализе. Только при этом полученные гармонические составляющие погрешности имеют инвариантный вид для их сравнения при измерении и формообразовании.

В настоящее время широко используют предложенное в работе [3] описание профиля детали тригонометрическим полиномом (1) с дополнительным введением первой гармоники, представляющей собой с определенной погрешностью искомый эксцентриситет центра средней окружности:

$$r_2(\varphi) = a_0 + e \cdot \cos(\varphi - \psi) + \sum_{i=2}^p a_i \cos(i\varphi - \psi_i), \quad (2)$$

где e, ψ – амплитуда и начальная фаза центра средней окружности детали.

Коэффициенты тригонометрического полинома (2) рассчитывают по формулам Бесселя:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_j; b_i = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n r_j \sin i\varphi_j; c_i = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n r_j \cos i\varphi_j, \quad (3)$$

где r_j – радиус j -й точки профиля детали; φ_j – полярный угол j -й точки профиля детали; n – число измеренных точек профиля детали.

Если число точек профиля n в формулах (3) удовлетворяет условию $n=2p+1$, то существует узловое совпадение значений тригонометрического полинома и действительных координат измеренных точек.

Традиционно считалось [3, 4], что в выражении (2) нулевая гармоника a_0 представляет собой радиус средней окружности профиля детали, первая гармоника (a_1, ψ_1) – эксцентриситет средней окружности относительно измерительной системы координат, а остальные гармоники (a_i, ψ_i) – периодические погрешности в виде овальности, огранки и волнистости. Поэтому компенсацию эксцентриситета осуществляли с помощью первой гармоники.

Оценим погрешность такого решения на основе гармонического анализа уравнения средней окружности профиля детали, эксцентрично расположенной относительно начала измерительной системы координат.

Уравнение средней окружности профиля детали с центром O в системе координат $(X_1; Y_1)$ (рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= r_0 \cos \varphi + e \cdot \cos \psi; \\ Y_1 &= r_0 \sin \varphi + e \cdot \sin \psi, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где φ – полярный угол в системе координат с полюсом O .

Уравнение окружности (4) в полярной системе координат с полюсом O_1 определим на основе известных преобразований:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}; \\ \varphi_1 &= \arctg(Y_1 / X_1), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где φ_1 – полярный угол в системе координат с полюсом O_1 .

Гармонический анализ подразумевает задание профиля конечным множеством точек с равномерным угловым расположением относительно начала системы координат. Для выполнения этого условия установим связь между углами φ и φ_1 из второго уравнения (5). Окончательно уравнение эксцентричной окружности примет вид:

$$r_1 = \sqrt{r_0^2 + e^2 + 2r_0 e \cos \left\{ \varphi_1 - \psi + \arcsin \left[\frac{e}{r_0} \sin (\varphi_1 - \psi) \right] \right\}}. \quad (6)$$

На рис. 2 дан пример, показывающий взаимное расположение средней окружности 1 радиуса $r=10$ мм с эксцентриситетом $e=5$ мм, характеризующей его первой гармоники 2 и их разность 3.

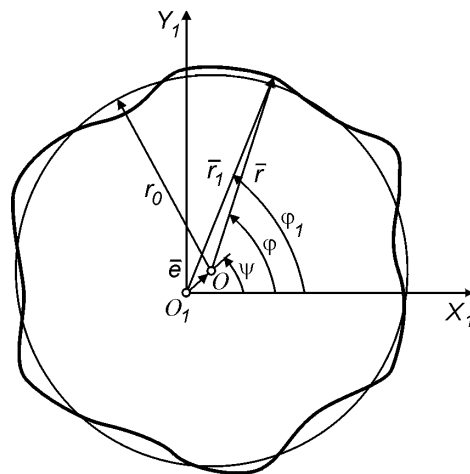


Рис. 1. Схема расчета параметров средней окружности профиля детали

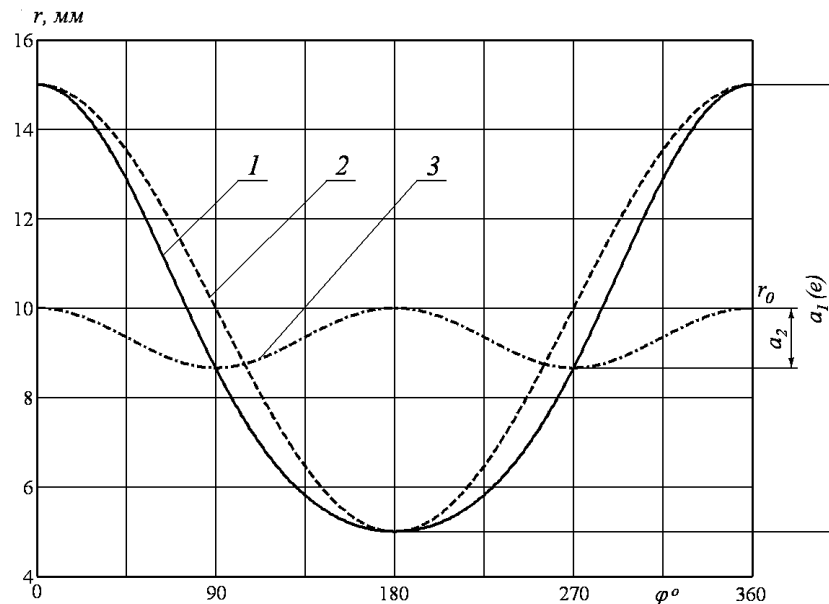


Рис. 2. Гармонический анализ средней окружности профиля детали

Гармонический анализ выражения (6) показал, что данная кривая описывается суперпозицией первой и четных гармоник ($p=1, 2, 4, \dots$) с амплитудами, быстро убывающими при увеличении порядка. Значимую величину в сравнении с амплитудой a_1 первой гармоники имеет только вторая гармоника a_2 . При этом первая гармоника однозначно определяет амплитуду e и начальную фазу ψ эксцентриситета. Поэтому эксцентриситет средней окружности профиля детали необходимо находить в виде суммы первой и второй гармоник.

Амплитуда a_2 второй гармоники нелинейно связана с амплитудой a_1 первой гармоники (рис. 3). Из графика видно, что соотношение амплитуд a_1 и a_2 зависит от соотношения e/r_0 . Максимальное значение $a_2/a_1 = 42\%$, достигается при эксцентриситете, равном радиусу средней окружности. В диапазоне $e/r_0 \leq 0,1$ указанная величина составляет около 2,5%. Если круглограмма анализируется графическим способом, где вместо радиуса детали рассматривается средний радиус записи, в большей степени соизмеримый с эксцентриситетом, то отклонения будут в несколько раз больше.

Возможны два пути минимизации погрешности, вызванной эксцентриситетом центра средней окружности профиля детали и начала координат при гармоническом анализе. Первый очевидный подход заключается в повторном расчете координат профиля в соответствии с выражением (5) после определения положения центра средней окружности в исходной системе координат на основе гармонического анализа профиля по выражению (2). Для выявления составляющих погрешности необходимо вновь провести гармонический анализ, но уже на основе выражения (1). Однако следует отметить, что после пересчета координат измеренных точек равномерность их углового расположения нарушается, что не позволяет использовать стандартный гармонический анализ.

Второй подход, имеющий практическое значение для радиусного способа измерения, для компенсации эксцентриситета использует корректирующий сигнал, равный сумме первой и второй гармоник средней окружности профиля детали. Для его формирования проводят гармонический анализ профиля на основе выражения (2), который дает характеризующие эксцентриситет первую и вторую гармоники. Затем находят новый профиль как разность полярных координат точек измеренного профиля и суммы первой и второй гармоник. В результате получают сцентрированную круглограмму и оценивают отклонение от круглости по известной методике.

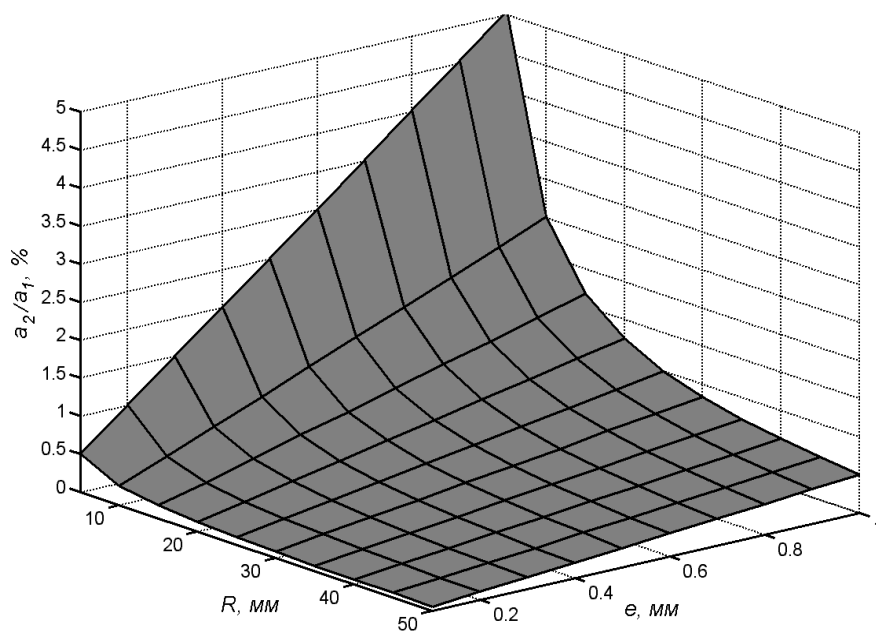


Рис. 3. Зависимость амплитуд первой и второй гармоник средней окружности профиля детали

При разностных измерениях в случае, когда эксцентриситет имеет постоянное значение, гармонический анализ позволяет уменьшить методическую погрешность в несколько раз в зависимости от условий измерения. Это достигается компенсацией погрешности базирования детали относительно шпинделя и биения самого шпинделя измерительного устройства. Особенно целесообразно использование данной методики при измерении в процессе обработки детали без предварительного центрирования [7].

В круглограмме детали находят отражение колебания в технологической системе, которые априорно неизвестны и могут быть оперативно идентифицированы с помощью искусственных нейронных сетей. С методологических позиций применение этих сетей является вполне оправданным, поскольку оценка параметров качества детали по параметрам виброакустического сигнала станка является типичной задачей распознавания и классификации образов, успешно решаемой с применением нейросетей. Суть предлагаемого подхода состоит в том, чтобы, записав сигналы о виброакустических колебаниях станка в процессе резания и произведя затем контроль детали традиционными методами с использованием соответствующего оборудования, обучить нейросеть в направлении установления соответствия между параметрами сигналов (например, в виде их амплитудного спектра) и показателями качества детали [8]. Впоследствии обученная нейросеть при подаче на ее вход вибросигнала распознает его (если такой или похожий на него сигнал имеется в сформированной при обучении выборке) и на выходе дает поставленные ему в соответствии в процессе обучения параметры качества детали, причем распознавание может происходить непосредственно в процессе обработки детали.

В качестве нейросети авторы использовали нейрокомпьютерную сеть встречного распространения. Во встречном распространении объединены два хорошо известных алгоритма: самоорганизующаяся карта Кохонена и звезда Гроссберга. Их объединение ведет к свойствам, которых нет ни у одного из них в отдельности. Самоорганизующаяся карта Кохонена выполняет классификацию входных векторов в группы схожих. Это достигается такой подстройкой весов, при которой близкие входные векторы активируют один и тот же нейрон данного слоя.

Обучение слоя Кохонена является самообучением, протекающим без учителя; необходимо лишь гарантировать, чтобы в результате обучения разделялись несхожие входные векторы. Задачей слоя Гроссберга является получение требуемых выходов. Фактически каждый нейрон слоя Гроссберга лишь выдает величину веса, который связывает этот нейрон с единственным ненулевым нейроном слоя Кохонена.

Полностью сеть встречного распространения функционирует подобно столу справок, способному к обобщению, причем обобщающая способность сети позволяет получать правильный выход даже при приложении входного вектора, который является неполным.

На основе изложенного подхода был создан программный продукт, работающий под управлением операционной системы Microsoft Windows для IBM-совместимого компьютера. Программа содержит все необходимые для проведения исследований инструменты, обладает удобным интерфейсом пользователя, средствами для визуализации входных сигналов и их спектрального представления, возможностью сохранения результатов обучения на жесткий диск и документирования.

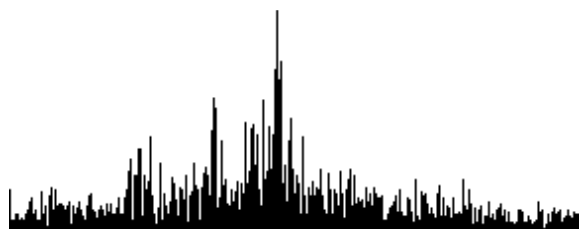
Далее в качестве примера приводятся результаты использования программы для распознавания параметров качества деталей из титанового сплава ОТ4, обработанных на автоматическом токарном станке 16A20Ф3 в ЗАО «Саратовский авиационный завод» с различными сочетаниями параметров технологического режима (скорости резания и подачи). Сигналы о виброколебаниях станка были записаны в полосе частот 2...10000 Гц пьезодатчиком, установленным на корпусе револьверной головки по вертикальной координате. Результаты измерений параметров качества деталей, выполненных с помощью приборов Talyrond 73 System (Taylor Hobson, Великобритания) и Surtronic 3+, представлены в таблице, где Ra – шероховатость, w_z – волнистость, Δ – отклонение от круглости.

Результаты определения параметров качества деталей программой представлены на рис. 4 и позволяют констатировать способность нейросети встречного распространения достаточно уверенно идентифицировать качество токарной обработки по виду спектра вибросигнала станка, генерируемого в его упругой системе процессом резания.

Вариации параметров качества деталей
при изменении параметров технологического режима

№ детали (сочетания)	Параметры качества, мкм		
	Ra	w_z	Δ
001	1,14	2,20	7,05
003	1,30	1,80	6,00
005	0,42	1,10	3,90
007	0,46	2,00	5,83
009	1,30	2,10	3,36
011	7,64	12,20	16,70
014	12,34	25,60	32,60
015	1,62	9,60	8,74
017	0,78	3,10	3,75

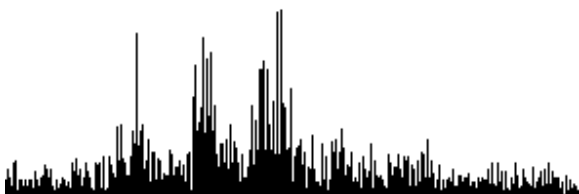
Аналогичные результаты были получены и при использовании программы для распознавания параметров качества наружных колец подшипников, обработанных на внутришлифовальном станке SIW4E в производственных условиях ОАО «Саратовский подшипниковый завод». При этом помимо вышеназванных параметров удалось обучить нейросеть распознаванию качества поверхностного слоя дорожек колец с точки зрения выявления на них локальных и периодических изменений в структуре, носящих характер прижогов.



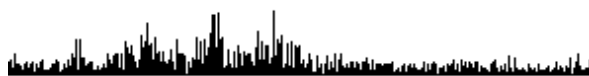
Вход слоя Кохонена:
спектры колебаний станка



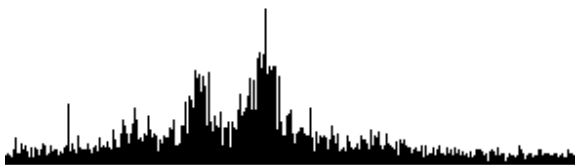
Вход слоя Кохонена:
спектры колебаний станка



Спектральный выход слоя Гроссберга,
соответствующий победившему нейрону
слоя Кохонена



Спектральный выход слоя Гроссберга,
соответствующий нейрону № 56
слоя Кохонена



Параметрический выход слоя Гроссберга,
соответствующий найденному спектру:
 $Ra=1,3$ мкм; $w_z=1,8$ мкм; $\Delta=6,0$ мкм



Параметрический выход слоя Гроссберга,
соответствующий найденному спектру:
 $Ra=1,3$ мкм; $w_z=2,1$ мкм; $\Delta=3,36$ мкм

Рис. 4. Результаты программного распознавания параметров качества деталей

Практическое применение представленных результатов дает возможность при измерении отклонения от круглости деталей априорно оценить методическую погрешность, обусловленную наличием эксцентриситета центра базовой окружности и начала измерительной системы координат, и при необходимости минимизировать данную погрешность на основе гармонического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гебель И.Д. Перенос некруглости базы на обрабатываемую поверхность при шлифовании на неподвижных опорах // Вестник машиностроения. 1966. № 9. С.67-70.
2. Бржозовский Б.М., Захаров О.В., Погораздов В.В. Формообразование поперечного сечения деталей при бесцентровом суперфинишировании // СТИН. 2002. № 12. С.24-27.
3. Ляндон Ю.Н. Основы взаимозаменяемости в машиностроении. М.: Машгиз, 1951. 142 с.
4. Авдулов А.Н. Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Изд-во стандартов, 1974. 176 с.

5. Spragg R.C. Accurate calibration of surface texture and roundness measuring instruments // Proc. Instr. Mech. Engrs., 1967-1968. P.32.

6. Серебренников М.Г. Гармонический анализ. М.: Огиз, 1948. 504 с.

7. Захаров О.В., Кочетков А.В., Сысуев Д.А. Метод измерения круглости детали на основе гармонического анализа // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 10. С.40-42.

8. Определение параметров качества изделий при механообработке в реальном времени на основе нейросетевых алгоритмов / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, В.В. Мартынов, А.Н. Ворыпаев // Нелинейная динамика и прикладная синергетика: Материалы Междунар. конф. Комсомольск-на-Амуре, 2003. С.62-65.

Бржозовский Борис Максович –

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Конструирование и компьютерное моделирование
технологического оборудования в машино- и приборостроении»
Саратовского государственного технического университета

Бровкова Марина Борисовна –

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем»
Саратовского государственного технического университета

Захаров Олег Владимирович –

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование
технологического оборудования в машино- и приборостроении»
Саратовского государственного технического университета