

БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНТРОЛЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО КОЛЬЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА

Е.В. Скрибанов, Н.Г. Горбачев, А.В. Колотов, А.С. Чистякова



СКРИБАНОВ
Евгений
Васильевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, информатика и системы управления» Московского государственного индустриального университета (МГИУ). Специалист в области систем с числовым программным управлением, автор более 45 научных статей, 12 изобретений и патентов.



ЧИСТЯКОВА
Александра
Сергеевна

Аспирантка МГИУ, инженер-программист. Награждена дипломом Министерством образования и науки РФ за лучшую студенческую научную работу в 2003 г. среди ВУЗов страны. Автор 7 научных статей (международных) и патента РФ на изобретение.



КОЛОТОВ
Алексей
Владимирович

Аспирант МГИУ, инженер-программист. Награжден дипломом Министерства образования и науки РФ за лучшую студенческую научную работу в 2003 г. среди ВУЗов страны. Автор 6 научных статей (международных) и патента РФ на изобретение.



ГОРБАЧЕВ
Николай
Геннадьевич

Аспирант МГИУ, инженер-исследователь УКЭР КБ «Автомобильной электроники» АМО ЗИЛ. Автор 6 научных статей, из них 4 – международные.

Введение

В мире ежегодно изготавливается около двух миллиардов зубчатых колес в год. Совершенствование их производства определяет на-

учно-технический прогресс для таких отраслей промышленности, как автомобильная и авиационная, станкостроение, машиностроение, судостроение и др. Основным потребителем зубчатых колес является автомобильная промышленность, причем практически все ведущие зарубежные производители автомобилей для повышения эксплуатационных характеристик вынуждены при производстве зубчатых колес перейти на формирование эвольвентного зацепления путем шлифования профиля. На предприятиях Российской Федерации такой способ используется только для прецизионных колес.

Производство зубчатых колес требует наличия сложных и дорогостоящих измерительных приборов, и сегодня это становится весьма серьезной проблемой: время контроля зубчатого колеса сопоставимо, а зачастую и превышает время его изготовления.

С точки зрения обеспечения качества зубчатых колес следует отметить, что для этих целей применяют различные виды приборов и машин – от накладных эвольвеномеров и шагомеров до сложнейших координатно-измерительных машин, например фирм Zeiss, Hoffler и др. Существующие приборы различаются по принципу работы и конструктивному исполнению и каждый из них позволяет контролировать ограниченное число параметров зубчатого колеса. Для полной оценки качества применяют последовательное измерение параметров зубчатого колеса на нескольких приборах. Кроме этого, подобные приборы имеют характерные недостатки. Например, накладные приборы имеют погрешность, связанную с их установкой на зубчатое колесо, а методы обкатки измерительным колесом не учитывают погрешности самого измерительного колеса [1]. Контрольно-измерительные машины, имеющие механические щупы, имеют недостатки, связанные с применением самих щупов: деформация щупов, износ, невозможность использования щупов для мелкомодульных колес и т.д. Даже ведущая в мире фирма по производству зубошлифовальных станков Reishauer (Швейцария) вынуждена

настраивать параметры станка после корректировки абразивного инструмента путем измерения первого изготовленного колеса.

Наличие столь большого количества видов контрольного оборудования при производстве зубчатых колес говорит о сложности проблемы. Несмотря на различные конструктивные отличия, можно выделить общие признаки построения и недостатки существующего контрольно-измерительного оборудования, применяемого для контроля зубчатых колес:

- практически все зубчатые колеса изготавливаются и контролируются методом обкатки, хотя исходная формула для формирования эвольвенты учитывает только радиус-вектор и угол поворота;
- все существующие приборы и машины для контроля параметров зубчатых колес используют контактный способ получения измерительной информации, что является основным недостатком из-за невозможности повышения производительности;
- невозможность создания на существующих принципах унифицированного прибора для контроля параметров зубчатых колес на одной измерительной позиции.

Постановка задачи контроля качества зубчатых колес

Все вышеупомянутое позволяет сделать вывод о необходимости поиска принципиально новых решений.

К сожалению, приходится констатировать, что отечественная промышленность не производит приборов для контроля зубчатых колес, и в основном российские предприятия оснащены приборами зарубежных фирм (Maag, Hoffler и др.).

Ниже рассматривается принцип создания и работы системы для бесконтактного измерения параметров зубчатых колес, основанной на новых физических и конструктивных решениях. В основе создания такой системы лежат следующие принципиальные позиции.

1. Отказ от метода обкатки и реализация формирования эвольвенты путем измерения

радиус-вектора и угла поворота для каждой точки эвольвенты. В настоящее время, если радиус-вектор может быть измерен с дискретностью 1 мкм и менее, то минимальная дискретность измерения угла угловым датчиком RON 886 фирмы Heidenhain, имеющим 36000 штрихов на оборот, составляет 36", в то время как необходимая дискретность измерения угловых перемещений должна находиться в интервале 0,3"–1".

2. Отказ от контактного метода получения первичной измерительной информации о параметрах эвольвенты и реализация бесконтактного способа получения информации от контролируемой поверхности зуба.

Это является сложнейшей научно-технической проблемой, так как информационный сиг-

нал представляет собой отраженный от поверхности зуба световой поток шириной 0,05 мм. Поскольку поверхность зуба не зеркальная, а имеет шероховатость, то амплитуда отраженного сигнала изменяется в десятки и более раз, что исключает традиционный амплитудный метод измерения и приводит к необходимости реализовать совершенно новый принцип преобразования оптического сигнала в электрический.

Принцип работы системы

На рис. 1 приведена функциональная схема системы бесконтактного измерения параметров зубчатого колеса, а на рис. 2 – временная диаграмма ее работы.

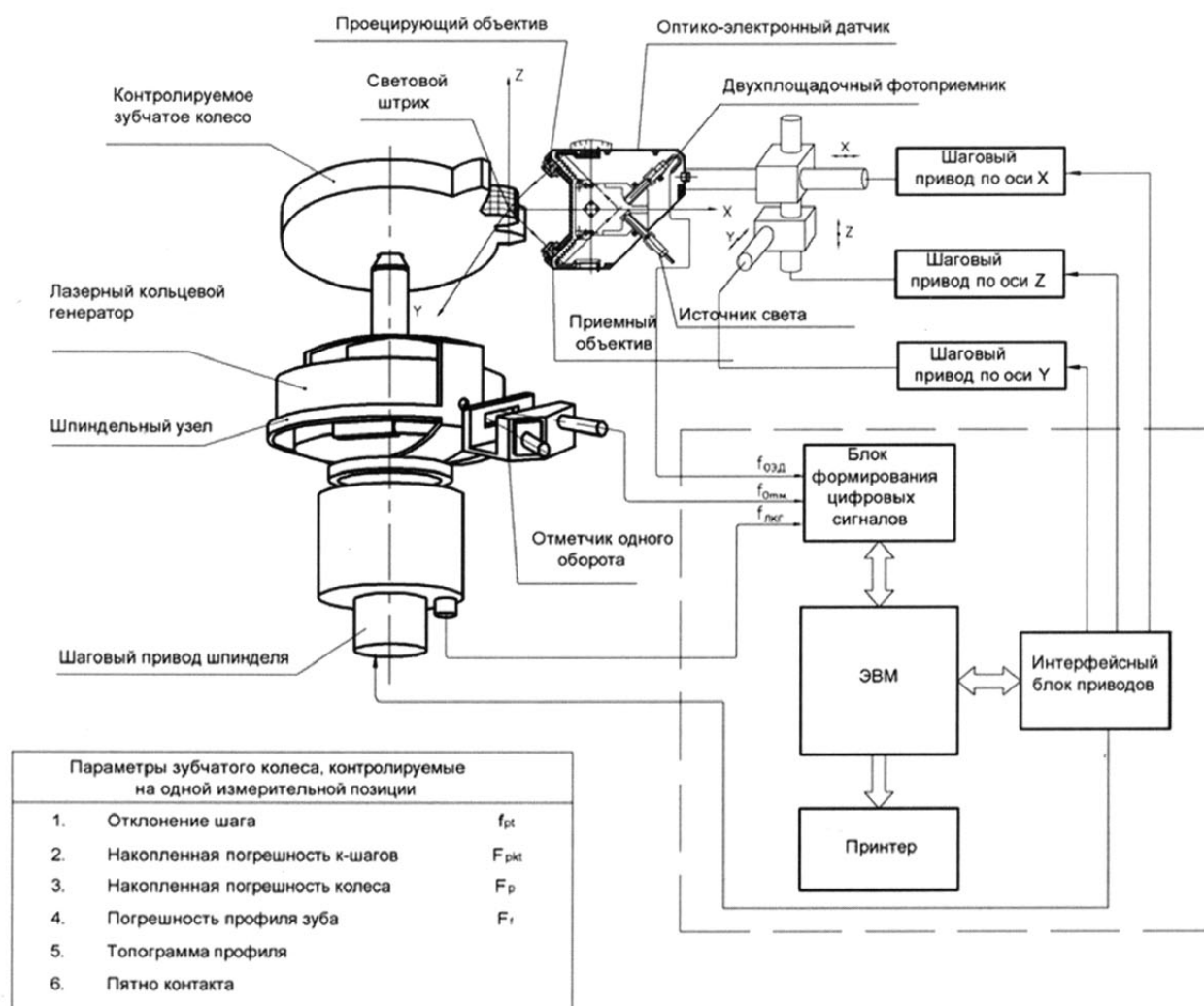


Рис. 1. Функциональная схема системы бесконтактного контроля параметров зубчатого колеса

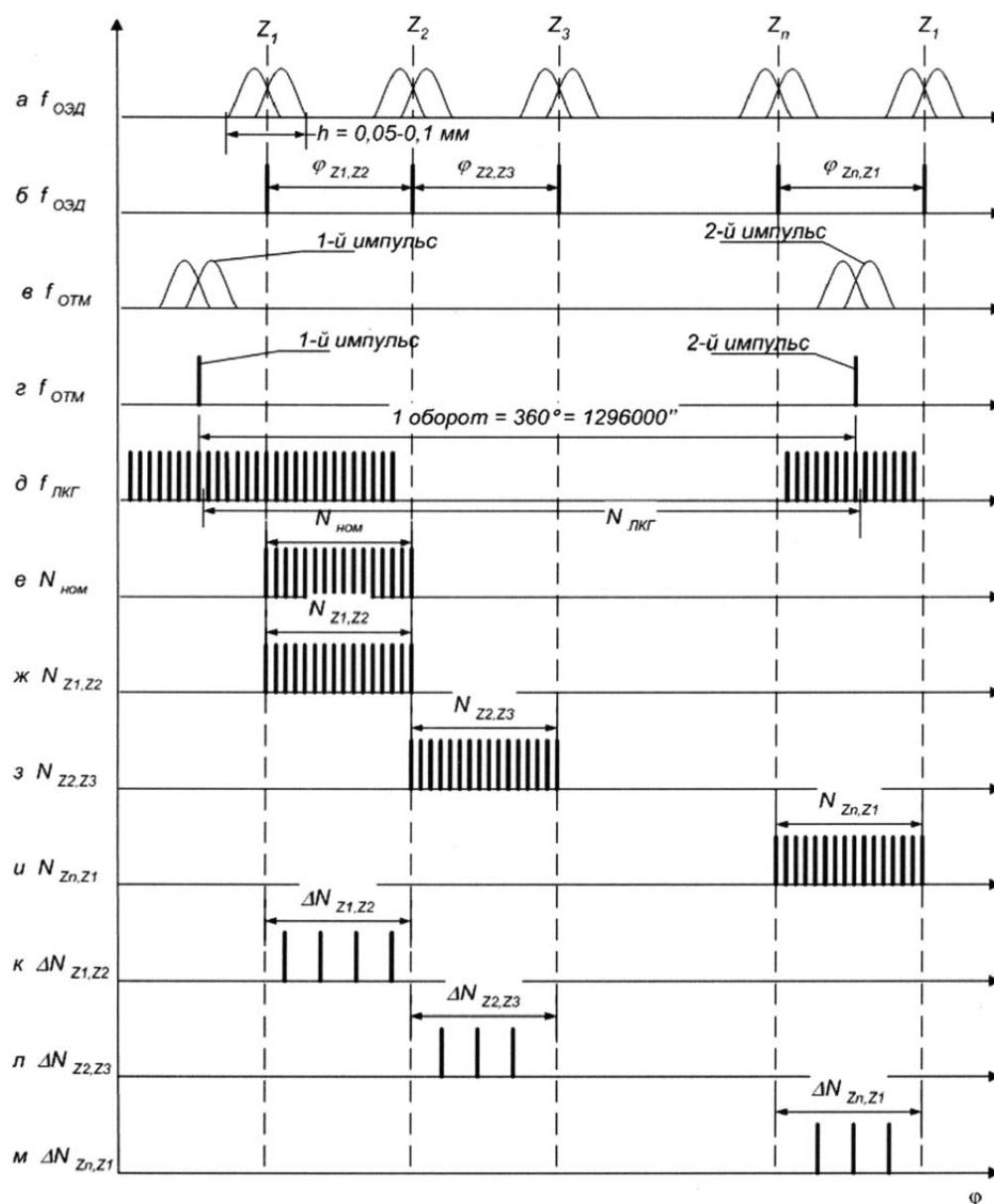


Рис. 2. Временная диаграмма работы системы бесконтактного контроля параметров зубчатых колес: а – последовательность импульсов на выходе ОЭД; б – последовательность импульсов на выходе блока формирования цифровых сигналов; в – последовательность импульсов на выходе отметчика одного оборота; г – последовательность импульсов на выходе блока цифровых сигналов; д – последовательность импульсов от ЛКГ; е – число импульсов, соответствующее величине номинального окружного шага; ж – число импульсов, соответствующее величине окружных шагов между зубьями z_1 и z_2 ; з – число импульсов, соответствующее величине окружных шагов между зубьями z_2 и z_3 ; и – число импульсов, соответствующее величине окружных шагов между зубьями z_n и z_1 ; к – число импульсов, соответствующее величине погрешности окружных шагов между зубьями z_1 и z_2 ; л – число импульсов, соответствующее величине погрешности окружных шагов между зубьями z_2 и z_3 ; м – число импульсов, соответствующее величине погрешности окружных шагов между зубьями z_n и z_1 .

Конструктивно система состоит из шпиндельного узла; оптикоэлектронного датчика (ОЭД); электронного блока, состоящего из блока формирования цифровых сигналов и интер-

фейсного блока приводов; трех шаговых приводов для перемещения ОЭД вдоль координатных осей X, Y и Z. На шпиндельном узле жестко закреплены контролируемое зубчатое колесо,

лазерный кольцевой генератор (ЛКГ) и привод вращения колеса.

От источника света через проектирующую щель и посредством проецирующего объектива ОЭД на поверхности зуба по делительной окружности создается световой штрих шириной 50 мкм.

При вращении колеса отраженный световой поток посредством приемного объектива попадает на светочувствительную поверхность двухплощадочного фотоприемника, где преобразуется в электрический сигнал, амплитуда которого характеризует вполне конкретную точку профиля эвольвенты каждого зуба. Следовательно, при повороте колеса на один оборот на выходе ОЭД будет число импульсов, равное числу зубьев контролируемого колеса ($z_1, z_2, \dots, z_n$ на рис. 2, а).

Величина окружного шага любых двух соседних зубьев будет определяться угловым расстоянием между двумя одноименными точками импульсов от этих зубьев [2].

В результате многочисленных экспериментов установлено, что наибольшую точность измерения обеспечивает дифференциальный метод, при котором угловое расстояние будет определяться моментом равенства амплитуд двух колоколообразных импульсов (рис. 2, б).

Поскольку существующие оптикоэлектронные датчики для получения высокоточных измерений не позволяют измерять угловые перемещения с дискретностью 0,3''–0,1'' в реальном масштабе времени, для измерения углового положения используется разработанный авторами прецизионный датчик на основе лазерного кольцевого эффекта.

Прецизионный датчик угловых перемещений

Принцип действия лазерного кольцевого генератора заключается в осуществлении режима генерации двух встречных волн, непосредственно реагирующих на угловую скорость вращения генератора вокруг нормали к плоскости ЛКГ. Информацией на выходе ЛКГ явля-

ется частота встречных волн ω_E , которая зависит от угловой скорости вращения.

$$\omega_E = k(\dot{\theta})\dot{\theta}, \quad (1)$$

где $k(\dot{\theta})$ – масштабный коэффициент.

Таким образом, ЛКГ является датчиком угловой скорости, и для использования его в качестве датчика угловых перемещений производится подсчет числа импульсов N за некоторый фиксированный промежуток времени T :

$$N = \frac{1}{2\pi} \int_0^T k(\dot{\theta}) \cdot \dot{\theta} \cdot dt. \quad (2)$$

При условии, что масштабный коэффициент $k(\theta) = \text{const}$ (зависит от параметров ЛКГ), а $\int \dot{\theta} \cdot dt = \theta$, угол поворота связан с числом импульсов:

$$\theta = 2\pi \cdot \frac{N}{k(\dot{\theta})}. \quad (3)$$

Ввиду большого значения масштабного коэффициента $k = 10^5 - 10^6$ одному импульсу соответствует поворот на очень малый угол θ , что и определяет большую разрешающую способность угловых измерений. Для практического использования выражение (3) удобнее представить в таком виде:

$$\theta = d \cdot N, \quad (4)$$

$$d = 2\pi/N_{360}, \quad (5)$$

где d (рад/имп.) – «цена» импульса; N_{360} – число импульсов ЛКГ за один полный оборот.

Для получения информации о параметрах вращения ЛКГ часть энергии встречных волн выводится из ЛКГ и подается на двухплощадочный фотоприемник, где образуется интерференционная картина, а на выходе формируются два гармонических сигнала.

Коррекция показаний ЛКГ

Лазерный кольцевой генератор является датчиком абсолютной угловой скорости, которая в рассматриваемом случае является векторной суммой угловой скорости вращения Земли и угловой скорости вращения ЛКГ относительно Земли.

В общем случае

$$\theta_{\text{общ}} = \int_0^T \omega_{\text{ЛКГ}}(t) dt \pm \int_0^T \omega_{\text{Зем}} dt, \quad (6)$$

где $\theta_{\text{общ}}$ – угол поворота ЛКГ в абсолютной системе координат, не связанной с вращением Зем-

ли; $\omega_{\text{ЛКГ}}$ – угловая скорость вращения ЛКГ относительно Земли, рад/с; $\omega_{\text{ЗШ}}$ – угловая скорость вращения Земли на данной широте, рад/с.

Знаки « $\pm$ » указывают на совпадение или несовпадение векторов угловых скоростей вращения ЛКГ и Земли. Таким образом, вращение Земли приводит к тому, что за один полный оборот к общему числу импульсов ЛКГ добавляются (если ЛКГ вращается в «прямом» направлении) или вычитаются (если ЛКГ вращается в «противоположном» направлении) импульсы, число которых зависит от скорости вращения ЛКГ и вертикальной составляющей скорости вращения Земли, а именно от географической широты.

Были проведены опыты по определению вертикальной составляющей скорости вращения Земли на широте Москвы, в результате чего получены значения дополнительного числа импульсов в зависимости от скорости вращения.

Результаты эксперимента представлены в таблице.

Таблица

Результаты определения скорости вращения Земли

№ эксперимента	t_0 , с	N_1 , имп	N_2 , имп	N_3 , имп	N_{360} , имп	$\omega_{\text{ЗШ}}$, °/с
1	1,5	1023823	1023853	15	1023838	12,66
2	2,0	1023820	1023859	20	1023840	12,34
3	2,5	1023813	1023862	25	1023838	12,41

Примечание: t_0 – время одного оборота ЛКГ; N_1 – количество импульсов при повороте ЛКГ в направлении вращения Земли; N_2 – количество импульсов при повороте ЛКГ в направлении, противоположном вращению Земли; N_3 – количество импульсов ЛКГ, соответствующее вращению Земли; N_{360} – количество импульсов ЛКГ при одном обороте в абсолютной системе координат; $\omega_{\text{ЗШ}}$ – вертикальная составляющая скорости вращения Земли.

При проведении эксперимента нестабильность времени одного оборота составляла ± 3 мс. Таким образом, существует возможность корректировки данных, получаемых с ЛКГ, т.е. учета влияния вертикальной составляющей скорости вращения Земли на показания ЛКГ. Это позволяет использовать данный датчик в стан-

ках с ЧПУ независимо от их территориального расположения.

Датчик угловых перемещений на основе кольцевого лазера позволяет измерять угловые перемещения с дискретностью до десятых долей угловой секунды без использования интерполяции и может применяться как датчик угловых перемещений в прецизионных измерительных системах, в станках с ЧПУ, а также для аттестации существующих датчиков угловых перемещений.

Проведение измерений

При повороте ЛКГ на один оборот, выдается различное число импульсов, обусловленное особенностью его принципа действия, в результате чего возникает необходимость фиксировать фактическое число импульсов $N_{\text{ЛКГ}}$ между двумя импульсами от отметчика одного оборота (рис. 2, в, г, д.).

Принципиальным является то, что первый импульс от ОЭД, появившийся после импульса от отметчика одного оборота, будет соответствовать первому зубу – z_1 второй импульс – z_2 и т.д. (см. рис. 2, а). Появление второго импульса от отметчика одного оборота будет соответствовать повороту ЛКГ на 360° , при этом будет зафиксировано $N_{\text{ЛКГ}}$ (рис. 2, д).

Фактическое угловое расстояние между двумя соседними зубьями, соответствующее величине окружного шага между этими зубьями, будет определяться числом импульсов от ЛКГ, т.е. $N_{z_1, z_2}, N_{z_2, z_3} \dots N_{z_n, z_1}$ (рис. 2, ж, з, и).

Данная информация поступает в микро-ЭВМ, где обрабатывается в соответствии с используемым вычислительным алгоритмом. Число импульсов $N_{\text{НОМ}}$, соответствующее номинальному угловому окружному шагу, определяется выражением (рис. 2, е)

$$N_{\text{НОМ}} = \frac{N_{\text{ЛКГ}}}{z}, \quad (7)$$

где z – число зубьев контролируемого колеса.

Для измерений с использованием системы полярных координат определяются следующие параметры [2]:

дискретность измерения углового расстояния

$$\Delta\varphi_{\text{ЛКГ}} = \frac{1296 \cdot 10^3}{N_{\text{ЛКГ}}}, \text{ "/имп.;} \quad (8)$$

угловые значения окружного шага ($t_{z_1, z_{i+1}}$)

$$\begin{aligned} \varphi_{z_1, z_2} &= N_{z_1, z_2} \cdot \Delta\varphi_{\text{ЛКГ}}, \\ \varphi_{z_2, z_3} &= N_{z_2, z_3} \cdot \Delta\varphi_{\text{ЛКГ}}, \\ \varphi_{z_n, z_1} &= N_{z_n, z_1} \cdot \Delta\varphi_{\text{ЛКГ}}. \end{aligned} \quad (9)$$

величина окружного шага ($t_{z_1, z_{i+1}}$, мкм)

$$\begin{aligned} t_{z_1, z_2} &= \frac{\pi \cdot m \cdot z \cdot 10^3 \cdot N_{z_1, z_2}}{N_{\text{ЛКГ}}}, \\ t_{z_2, z_3} &= \frac{\pi \cdot m \cdot z \cdot 10^3 \cdot N_{z_2, z_3}}{N_{\text{ЛКГ}}}, \\ t_{z_n, z_1} &= \frac{\pi \cdot m \cdot z \cdot 10^3 \cdot N_{z_n, z_1}}{N_{\text{ЛКГ}}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где m – модуль контролируемого колеса.

Погрешности измерения окружных шагов в угловых $\Delta\varphi_{z_1, z_{i+1}}$ и линейных $\Delta t_{z_1, z_{i+1}}$ величинах можно представить как:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{z_1, z_2} &= \Delta N_{z_1, z_2} \cdot \Delta\varphi_{\text{ЛКГ}}, \\ \Delta\varphi_{z_2, z_3} &= \Delta N_{z_2, z_3} \cdot \Delta\varphi_{\text{ЛКГ}}, \\ \Delta\varphi_{z_n, z_1} &= \Delta N_{z_n, z_1} \cdot \Delta\varphi_{\text{ЛКГ}}, \\ \Delta N_{z_1, z_2} &= \Delta N_{z_1, z_2} - N_{\text{НОМ}}, \\ \Delta N_{z_2, z_3} &= \Delta N_{z_2, z_3} - N_{\text{НОМ}}, \\ &\dots \\ \Delta N_{z_n, z_1} &= \Delta N_{z_n, z_1} - N_{\text{НОМ}}, \\ \Delta t_{z_1, z_2} &= t_{z_1, z_2} - t_{\text{НОМ}}, \\ \Delta t_{z_2, z_3} &= t_{z_2, z_3} - t_{\text{НОМ}}, \\ &\dots \\ \Delta t_{z_n, z_1} &= t_{z_n, z_1} - t_{\text{НОМ}}, \\ t_{\text{НОМ}} &= \frac{\pi \cdot m \cdot z \cdot 10^3 \cdot N_{\text{НОМ}}}{N_{\text{ЛКГ}}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\Delta N_{z_1, z_2}, \Delta N_{z_2, z_3}, \dots, \Delta N_{z_n, z_1}$ – отклонения окружных шагов в импульсах (см. рис. 2, к, л, м); $t_{\text{НОМ}}$ – величина номинального окружного шага, мкм.

Погрешность шага по дуге произвольной окружности

$$\Delta t_{z_n, z_{n+1}} = t_{z_n, z_{n+1}} - t_{\text{НОМ}} = \frac{2\pi r (N_{z_n, z_{n+1}} - N_{\text{НОМ}})}{N_{\text{ЛКГ}}} \text{ (мкм)}, \quad (12)$$

где r – радиус произвольной окружности колеса; $\Delta N_{z_n, z_{n+1}}$ – угловое расстояние в импульсах между двумя соседними зубьями колеса.

Накопленная погрешность измерения окружного шага колеса

$$F_{\text{нак}} = |\Delta t_{\text{max}}| - |\Delta t_{\text{min}}| \text{ (мкм)}, \quad (15)$$

где $\Delta t_{\text{max}}, \Delta t_{\text{min}}$ – наибольшая и наименьшая величины суммы отклонений шага соответственно.

Система работает в автоматическом режиме, для измерения достаточно ввести модуль m и число зубьев z контролируемого колеса.

Алгоритм работы включает проверку на соответствие равенства числа импульсов от ОЭД фактическому числу зубьев колеса при повороте колеса на 360° (рис. 2, а)

$$|z_1 + z_2 + \dots + z_n| = z, \quad (16)$$

а также проверку равенства суммы импульсов измеренных шагов фактическому числу импульсов $N_{\text{ЛКГ}}$

$$|N_{z_1, z_2} + N_{z_2, z_3} + \dots + N_{z_n, z_1}| = N_{\text{ЛКГ}}. \quad (17)$$

Таким образом, условия (16) и (17) используются в алгоритме для проверки правильности и коррекции результатов измерения.

На рис. 3 приведены экспериментальные результаты измерения окружного шага и накопленной погрешности в зубчатом колесе с $m = 4$ и $z = 37$.

Для измерения необходимо ввести модуль контролируемого колеса m , число зубьев z и число полных оборотов; далее контроль колеса производится в автоматическом режиме.

Практически одновременно в цифровой форме выдаются параметры окружного шага, его отклонение от номинального значения для каждого зуба колеса, величина, а также график накопленной погрешности колеса.

Для повышения точности измерения система позволяет многократно определять указанные параметры и вычислять их средние значения. На рис. 4 представлен график, где число измерений равно 10, т.е. полученных за 10 полных оборотов колеса.

Опыт работы с системой бесконтактного контроля колес показывает, что время измерения за один оборот зубчатого колеса (1–2 с) окружных шагов и накопленной погрешности сокращается более чем в 100 раз по сравнению с лучшими зарубежными аналогами.

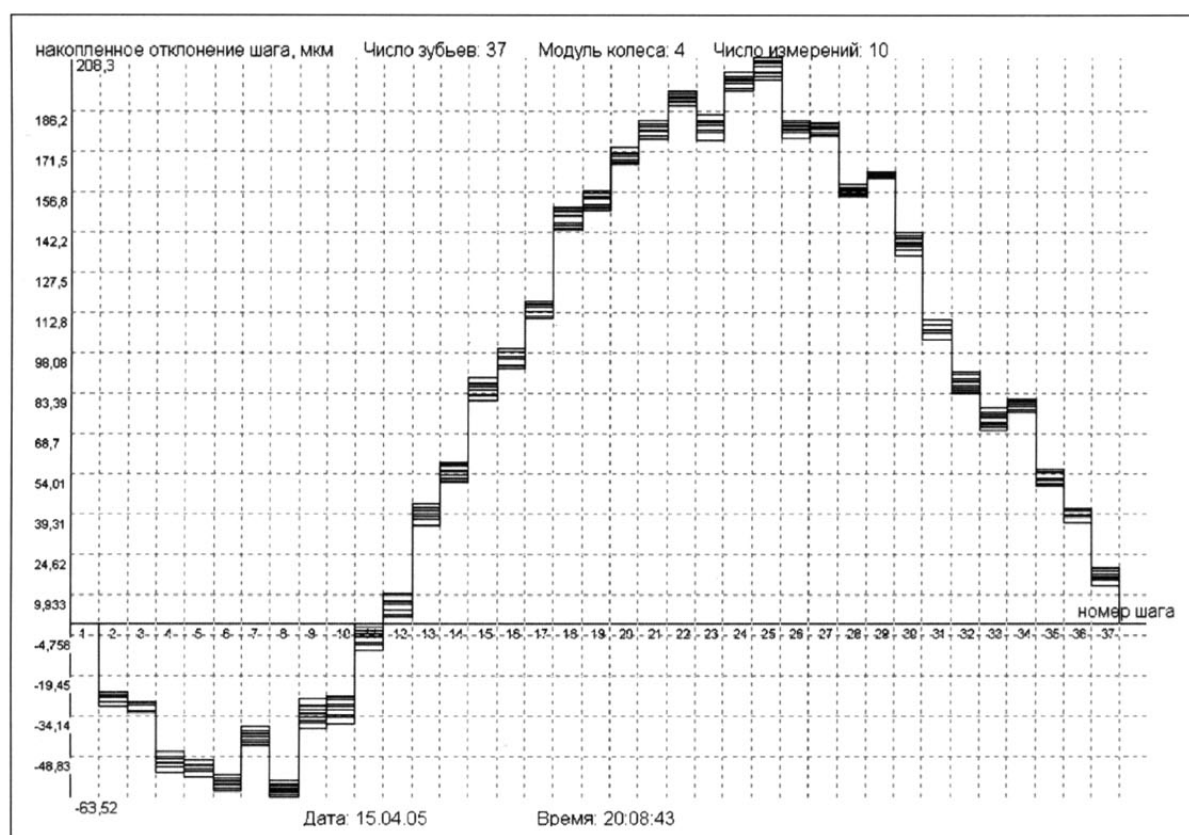


Рис. 3. График накопленной погрешности

Заключение

Система для бесконтактного контроля зубчатых колес с использованием лазерного кольцевого генератора позволяет:

- реализовать принципиально новый метод измерения параметров зубчатых колес, основанный на использовании системы полярных координат, вместо существующего в мировой практике косвенного метода обкатки;
- по сравнению с существующими контактными методами сократить время контроля в 100 и более раз;
- осуществлять контроль на одной позиции без использования эталонного колеса таких параметров, как окружной шаг, накоп-

ленная погрешность, погрешность профиля, топограмма профиля, пятно контакта.

Таким образом, изложенные принципиальные решения делают возможным создание универсальной измерительной системы для всего многообразия зубчатых колес.

Список литературы

1. Марков А.Л. Измерение зубчатых колес. – Л.: Машиностроение, 1977. – 280 с.
2. Скрибанов Е.В., Брюханов В.Н., Курятов В.Н., Таратынов О.В. Бесконтактное измерение параметров зубчатых колес с использованием полярных координат // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 1. С. 36–39.