

УДК 621.01:004:347.78

В.М. Пашкевич, канд. техн. наук, доц., Д.А. Забелин

ВЫЯВЛЕНИЕ МЕСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Рассмотрены вопросы, связанные с выявлением местных дефектов в ходе кинематического контроля зубчатых передач. Предложены алгоритмы, позволяющие оценить размеры местных дефектов, а также установить принадлежность данных дефектов ведущему или ведомому колесу передачи по результатам кинематического контроля.

Особенностью местных дефектов зубчатых колес является то, что они, как правило, проявляются на отдельных зубьях. Местные дефекты зубьев механических передач во многом определяют плавность их работы и условия контакта. Поэтому выявление местных дефектов зубчатых колес на этапе их контроля в процессе сборки представляет актуальную в практическом плане задачу. Решению этой задачи, в котором используется математический анализ кинематических погрешностей передачи, посвящена данная статья.

Одним из наиболее перспективных методов исследований местных дефектов является 3D-моделирование процесса образования кинематических погрешностей передач. Моделирование кинематической погрешности зубчатых колес было реализовано в среде AutoCAD с использованием встроенного языка VBA.

В наших исследованиях моделировались местные дефекты в форме выступа и впадины на боковой поверхности зуба. Дефекты такого вида весьма четко отражаются в кинематической погрешности механизма. Так, на рис. 1, а показан смоделированный график кинематической погрешности передачи с модулем $m = 4,5$ мм и числом зубьев колес $z_1 = 15$ и $z_2 = 31$, при геометрическом эксцентриситете ведомого колеса ($e = 0,050$ мм). При этом на боковой поверхности одного из зубьев ведомого колеса моделировался дефект, представляющий собой выступ на боковой поверхности одного из зубьев. Влияние такого дефекта отражается в сигнале кинематической погрешности в виде выброса, проявляющегося один раз за оборот колеса и направленного вверх.

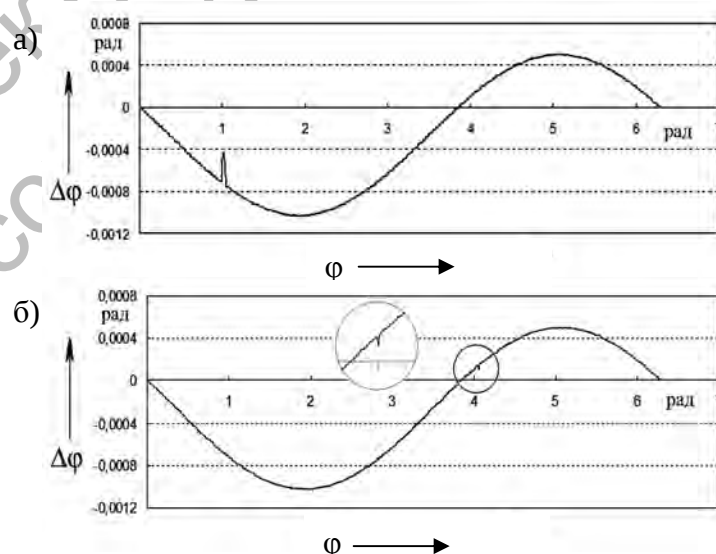


Рис. 1. Проявление местных дефектов в виде выступа и впадины на боковой поверхности зуба в сигнале кинематической погрешности

Местный дефект в виде впадины на боковой поверхности, так же как и выступ, отражается в виде выброса на графике кинематической погрешности, направленного в обратную сторону (рис. 1, б). Однако его величина намного меньше, чем величина выброса от выступов. Данное обстоятельство делает обнаружение таких местных дефектов возможным только при детальном рассмотрении графика кинематической погрешности.

В отличие от графика кинематической погрешности, графики угловых скоростей, полученные численным дифференцированием кинематической погрешности, позволяют более надежно выявлять различные местные дефекты в силу того, что производная функции более чувствительна к ее резким скачкам. Данный факт может быть успешно использован для выявления по записи кинематической погрешности таких дефектов, как забоины, сколы, трещины и т.д.

Результаты 3D-моделирования показывают также, что зависимость амплитуды выброса кинематической погрешности от размера вызвавшего его дефекта в форме выступа представляет собой практически линейную зависимость (рис. 2, а). Так, данные, представленные на этом рисунке, описываются уравнением линейной регрессии с коэффициентом корреляции $r = 0,999$:

$$h = 65,762 \cdot 10^3 \cdot \Delta\varphi_2, \quad (1)$$

где h – высота выступа в мкм; $\Delta\varphi_2$ – амплитуда выброса, рад.

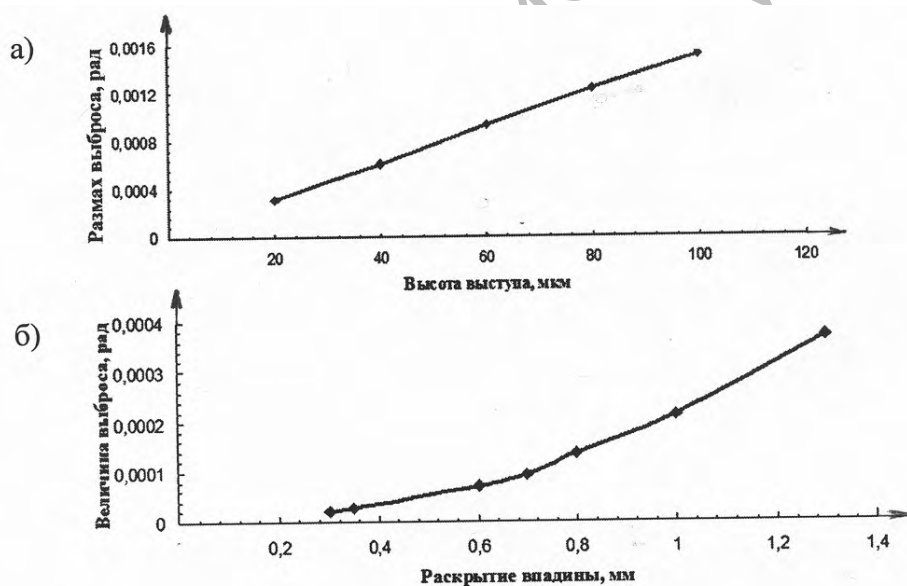


Рис. 2. Зависимость амплитуд выбросов кинематической погрешности от размеров, вызывающих дефекты

Очевидно, что местный дефект высотой h_{def} (в окружном направлении ведомого колеса) вызовет дополнительный поворот колеса на угол $\Delta\varphi_2$:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{h_{def}}{r_2}, \quad (2)$$

где r_2 – радиус, на котором находится дефект.

С достаточной степенью точности можно принять величину этого радиуса равной

величине делительного радиуса основной окружности, если его величина заметно больше высоты зуба. На основе формулы (2) можно легко решить и обратную задачу: найти по величине выброса кинематической погрешности $\Delta\varphi_2$ высоту h_{def} вызвавшего его местного дефекта. Очевидно также, что дефект является недопустимым, если его высота превышает допуск на отклонение профиля f_f .

Аналогичные выводы могут быть распространены на местные дефекты в виде впадины (рис. 2, б). Однако при этом необходимо учитывать эффекты «маскирования» местных дефектов, связанные с тем, что взаимодействие боковых поверхностей зубьев с достаточной точностью может быть аппроксимировано взаимодействием дуг двух окружностей, катящихся друг по другу. Рассмотрим этот эффект подробнее.

Радиус боковой поверхности зуба в первом приближении может быть принят равным ее радиусу в вершине зуба В (рис. 3, а):

$$\rho_y = \sqrt{(r_{\text{верш}}^2 - r_0^2)}, \quad (3)$$

где $r_{\text{верш}} = m(z/2 + 1)$ - радиус вершин зубьев; $r_0 = mz/2 \cdot \cos 20^\circ$ - радиус основной окружности.

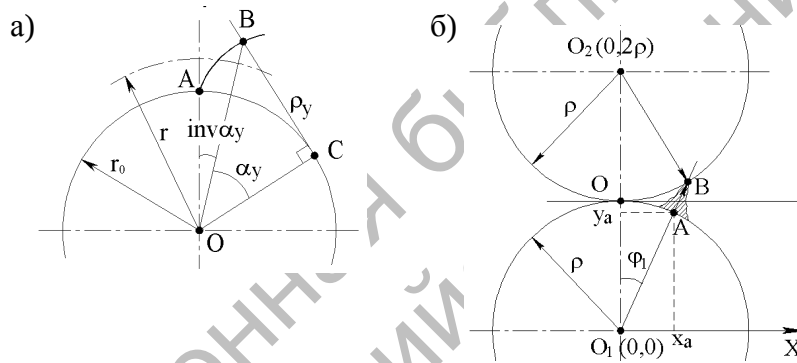


Рис. 3. К определению размеров выявляемого выступа

Из рис. 3, б видно, что если высота дефекта равна $\overline{AB} = h_{def}$, все другие дефекты, высота которых меньше h_{def} и находящиеся в зоне «маскирования» шириной $2OA = s_{def}$, не могут быть выявлены, так как не имеют контакта с боковой стороной сопряженного зуба и, следовательно, не вызывают изменения его углового положения. Таким образом, при оценке размера дефекта в форме выступа высотой h_{def} оценка его реальной ширины оказывается ограниченной сверху величиной s_{def} . Кроме того, данное обстоятельство позволяет определить и предельное значение выявляемого периода волнистости на поверхности зубьев.

Таким образом, алгоритм оценки размера местного дефекта в форме выступа по выбросу кинематической погрешности амплитудой $\Delta\varphi_2$ сводится к следующему.

На первом этапе по формуле (2) рассчитывается оценка высоты дефекта h_{def} . Оценку его ширины s_{def} поясним с помощью рис. 5, б. Видно, что вершина дефекта В лежит на конце радиус-вектора $\rho_{new} = \rho_y + h_{def}$ и имеет координаты

$$\left. \begin{aligned} x_b &= \rho_{new} \cdot \sin \varphi_1 \\ y_b &= \rho_{new} \cdot \cos \varphi_1 \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Кроме того, эта точка лежит на окружности 2. Очевидно, что, задавшись точностью решения ε и придавая углу φ_1 приращения от нулевого положения по формуле $\varphi_1 = i \cdot d\varphi$, можно найти такое значение этого угла, при котором выполняется условие

$$|L(O_2B) - \rho_y| < \varepsilon, \quad (5)$$

эквивалентное тому, что точка В одновременно лежит как на вершине радиус-вектора ρ_{new} , так и на окружности 2, т.е. касается вершины дефекта. Для такого углового положения предельный размер ширины выявленного дефекта равен величине

$$s_{def} = 2 \cdot \rho_y \cdot \varphi_1, \quad (6)$$

не превышающей размера зуба: $s_{def} \leq 2,25m$.

При выявлении дефектов в форме впадин можно оценить величину их раскрытия ВС (рис. 4), однако при этом оценка их высотных размеров (глубины) недоступна.

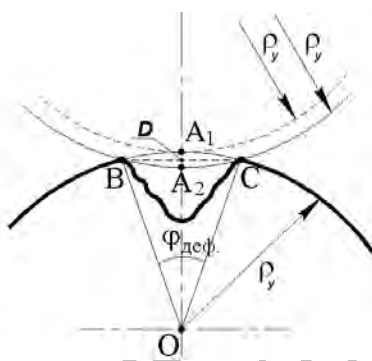


Рис. 4. К определению размеров выявляемой впадины

Очевидно, что наличие впадины приведет к дополнительному смещению сопряженного профиля на величину A_1A_2 , которая может быть определена по записи кинематической погрешности согласно формуле (2) и равна:

$$A_1A_2 = mz_2/2\Delta\varphi_2. \quad (7)$$

Катет OD треугольника ODC равен:

$$OD = \rho_y - \frac{A_1A_2}{2}. \quad (8)$$

Оценкой раскрытия дефекта будет длина отрезка BC, что эквивалентно условию

$$s_{def} = 2\sqrt{(\rho_y^2 - OD^2)}. \quad (9)$$

При этом глубина дефекта будет не менее $h_{def} \geq \frac{A_1A_2}{2}$.

Другим вопросом, решение которого необходимо при выявлении местных дефектов, является вопрос о выяснении принадлежности дефекта ведущему или ведомому колесу передачи (разделение погрешностей). Общий алгоритм такого разделения был

ранее рассмотрен нами в [1], сводится он к применению процедуры так называемого синхронного накопления по многократной записи кинематической погрешности. При этом разделение погрешностей колес базируется на простом частотном разделении их сигналов. Так, дефект, относящийся к ведомому колесу передачи, проявляется однократно за оборот этого колеса, а дефект ведущего колеса проявляется U раз за оборот ведомого колеса (U – передаточное отношение механизма). Так как угловое перемещение $\Delta\varphi_1$ ведомого колеса в точке k , вызванное этим дефектом, будет также и ослаблено по амплитуде в U раз, можно записать следующее выражение для определения размера h_{def} местного дефекта на ведущем колесе:

$$\Delta\varphi_1(k) = U \left[\frac{1}{U} \sum_{i=0}^{U-1} \Delta\varphi_2(k + i \frac{N}{U}) \right] = \sum_{i=0}^{U-1} \Delta\varphi_2(k + i \frac{N}{U}); \quad (10)$$

$$h_{def} = r_1 \Delta\varphi_1. \quad (11)$$

где N – число отсчетов кинематической погрешности за один оборот ведомого колеса; $\Delta\varphi_1$ – амплитуда выброса кинематической погрешности за счет наличия местного дефекта.

Отделение дефектов ведомого колеса производится простым усреднением координат кинематической погрешности по всей совокупности периодов записи:

$$\Delta\varphi_2(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \Delta\varphi_2(k + iN); \quad (12)$$

$$h_{def} = r_2 \Delta\varphi_2, \quad (13)$$

где M – число записанных оборотов ведомого колеса.

Описанный подход к контролю зубчатых колес нашел подтверждение в результатах экспериментальных исследований. На основе этого подхода был создан программно-аппаратный комплекс «Кинематометр», позволяющий вести разбраковку и управлять процессом сборки зубчатых пар на основе минимизации влияния на качественные показатели передачи местных погрешностей и погрешностей взаимного положения ее колес (рис. 5).

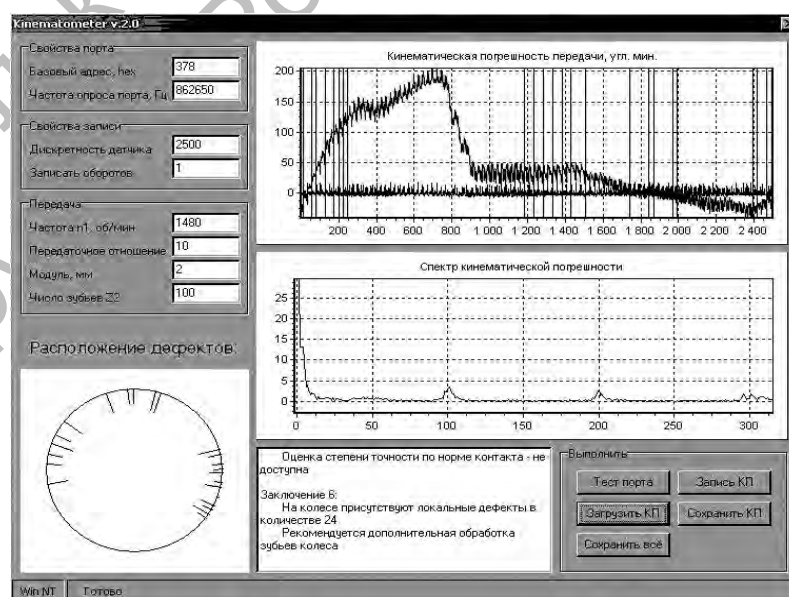


Рис. 5. Панель аппаратно-программного комплекса «Кинематометр»

Функциональные возможности прибора позволяют оперативно определять степени точности передачи по нормам кинематической точности, плавности и, после дополнительного обучения, по норме контакта зубьев. Дополнительными возможностями являются: индикация монтажных смещений осей колес, а также схемы взаимного расположения дефектов колес и их относительных размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашкевич, В. М.** Разделение кинематических погрешностей зубчатых пар / В. М. Пашкевич // Машиностроение: сб. науч. тр. – Мн. : Технопринт, 2004. – Т. 1, вып. 20. - С.43-49.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 31.10.2005

V.M. Pashkevich, D.A. Zabelin
Revelation of local defects of gear
transmissions
Belarusian-Russian University

In the article questions of revelation of local defects of gear transmissions on a signal of kinematics errors are considered. Algorithms to determine dimensions of local defects and its location by results of the kinematic control are offered.