

**СИНАН ТАЛИБ**, аспирант ВНУ им. В. Даля, Луганск;  
**С. Н. ШВЕЦ**, канд. техн. наук, доц. ВНУ им. В. Даля, Луганск;  
**В. В. ЯКОВЕНКО**, д-р техн. наук, проф. ВНУ им. В. Даля, Луганск

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТА ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**

Предложены способы анализа выходных сигналов датчика частоты вращения при определении дефектов зубчатого колеса с оценкой их эффективности.

**Ключевые слова:** дефект, зубчатое колесо, скорость вращения, обработка, дискретные функции.

**Введение.** Контроль целостности зубьев шестерни трансмиссий транспортных машин и бронетехники является актуальной технической задачей, особенно в условиях пустыни. Сложность этой задачи заключается в необходимости контроля целостности шестерни непосредственно во время эксплуатации. Для решения этой задачи можно использовать магнитные датчики частоты вращения зубчатого колеса (ЗК), поскольку они обладают достаточно низким порогом чувствительности, высокой надежностью [1] и способны функционировать в условиях загрязненной среды, при высоком уровне вибраций и повышенной температуре. Магнитные датчики частоты вращения формируют сигнал на каждый зуб шестерни и отсутствие одного или нескольких зубьев, а также их износ, можно фиксировать при соответствующей обработке сигналов датчика. Способов анализа выходных сигналов датчика может быть несколько и отличаться они могут достоверностью информации и сложностью алгоритма анализа. В настоящей работе рассматриваются несколько методов обработки сигналов и оценивается их эффективность.

**Целью работы** является оценка способов обработки выходных сигналов датчика частоты вращения ЗК с целью обнаружения дефектов одного или нескольких зубьев.

### **Определение дефекта «отсутствие зуба» по средней скорости вращения ЗК.**

Прямым методом определения отсутствия зуба зубчатого колеса (ЗК) является подсчет зубьев за один оборот, но при этом требуется дополнительный датчик оборотов, для которого требуется установка на шестерни элемента, дающего возможность фиксировать один оборот ЗК. Установка дополнительного датчика усложняет систему контроля и может быть оправдана лишь в отдельных случаях. С точки зрения информационной надежности этот способ является наиболее приемлемым вариантом.

Наиболее простым по способу обработки выходных сигналов датчиков частоты вращения является определение наличия дефекта по средней скорости вращения ЗК.

Пусть определяется средняя частота вращения ЗК с числом зубьев  $z$ , угловой скоростью  $\omega$  за время  $t_u$ , на счетчик при этом поступает  $N$  импульсов. Среднее значение скорости, измеренное системой, будет определяться выражением

$$\omega_{cp} = \frac{\alpha}{t_u} = \frac{2\pi N}{zt_u}, \quad (1)$$

или

$$n_{cp} = \frac{60N}{zt_u}, \text{ об/мин} \quad (2)$$

Основные погрешности при определении среднего значения скорости будут погрешности квантования сигнала, воспроизведение квантов измерительного преобразователя и погрешность задания временного интервала  $t_u$ . Все перечисленные погрешности могут быть отнесены к разряду случайных, и для них справедливы средние квадратичные оценки.

Погрешность квантования определяется методической и возникает в результате дискретного характера поступающей на вход информации об угле поворота.

Чтобы показания прибора были непосредственно в радианах в секунду, или оборотах в минуту необходимо, чтобы

$$z = \frac{2\pi}{t_u} \cdot 10^m, \text{ или } z = \frac{60}{t_u} \cdot 10^m, \quad m = 0,1,2..k.$$

В этом случае  $\omega_{cp} = N \cdot 10^{-m}$  рад/с,  $n_{cp} = N \cdot 10^{-m}$  об/мин.

В отсутствие синхронизации между импульсами измерительного преобразователя (дискретного) в интервале измерений  $t_u$  основная погрешность квантования имеет треугольный закон распределения, и относительная средняя квадратическая оценка может быть записана как

$$\sigma_N = \frac{1}{\sqrt{6N}} = \frac{1}{\sqrt{6\omega_{cp}zt_u}}. \quad (3)$$

Как следует из формулы (2) при отсутствии зуба в ЗК, то есть при изменении  $z$ . Для увеличения чувствительности измерительной системы к этому изменению требуется уменьшить  $t_u$ .

Возможен метод определения отсутствия зуба по временному интервалу между двумя соседними импульсами. Длительность каждого интервала между двумя импульсами запоминается и сравнивается с длительностью последующего временного интервала. Если разность временных интервалов превышает

допустимый предел, то это является отсутствием зуба ЗК. Для реализации этого метода требуется нестандартная схема обработки сигналов датчиков частоты вращения, что в практике не всегда приемлемо.

**Определение наличия дефекта ЗК путем дифференцирования выходного сигнала датчика частоты вращения.**

Определить отсутствие зуба в ЗК можно путем дифференцирования дискретного сигнала датчика.

Выходной сигнал измерительных преобразователей в виде импульсов с интервалов следования  $T_0$  подается на устройство дифференцирования. Передаточная функция непрерывного дифференцирующего звена

$$W_{\phi} = (p) = k_0 p \tag{4}$$

где  $k_0$  - коэффициент пропорциональности. Вход и выход дифференцирующего устройства связаны дифференциальным уравнением

$$y(t) = k_0 \frac{dx}{dt} \tag{5}$$

В общем случае,  $Z$  –преобразование от передаточной функции (4) не существует, поэтому дискретная передаточная функция цифрового дифференцирующего звена получается из разностного уравнения. Выходной непрерывный сигнал датчика описывается решетчатой функцией [2]

$$x[i] = x(t) \Big|_{t=iT_0},$$

где  $i$  - целое число,  $T_0$  - период дискретизации. По решетчатой функции построим интерполяционный полином Лагранжа:

$$L_n(t) \sum_{i=0}^n \Pi_{n+1}(t) x[i] / (t - iT_0) \Pi_{n-1}^i(iT_0)$$

где  $\Pi_{n+1}(t) = (t - 0T_0)(t - 1T_0)(t - 2T_0) \dots (t - nT_0)$ , тогда  $L_n(iT_0) = x[i]$ .

Полагая  $(t - 0T_0) / T_0 = q$ , получаем

$$\Pi_{n+1}(t) = T_0^{n+1} \cdot q \cdot (q - 1) \dots (q - n) = T^{n+1} q^{n+1} \text{ и}$$

$$\Pi_{n+1}(iT_0) = (iT_0 - 0T_0)(iT_0 - 1T_0) \dots (iT_0 - nT_0) = (-1)^{n-i} T^n i!(n-i)!,$$

следовательно, для полинома Лагранжа справедливо:

$$L_n(t) = \sum_{i=0}^n (-1)^{n-i} x[i] / [i!(n-i)!] \cdot q^{n+1} / (q - i), \tag{6}$$

Учитывая, что  $\frac{dt}{dq} = T_0$ , получаем

$$x'(t) \approx L'_n(t) = \frac{1}{T_0} \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^{n-i} x[i]}{i!(n-i)!} \cdot \frac{d}{dq} \left\{ \frac{q^{[n+1]}}{q-i} \right\}, \tag{7}$$

Как видно из формулы (7) величина первой производной обратно пропорциональна  $T_0$  и при отсутствии зуба может увеличиваться в 2 раза.

Из уравнения (7) можно вывести разностные уравнения для программной реализации алгоритма цифрового дифференцирования при различном количестве точек входного сигнала, используемых в цикле вычисления значений производной. Получим разностные уравнения для программной реализации алгоритма цифрового дифференцирования и определим их погрешности дифференцирования для различного числа точек. Для  $n=1$  имеем

$$L_1(t) = \sum_{i=0}^1 (-1)^{1-i} x[i] / [i!(1-i)!] \cdot q^2 / (q-i) = -x[0](q-1) + x[1]q,$$

Учитывая, что  $\frac{dt}{dq} = T_0$ , получаем  $x'(t) \approx L_1'(t) = \{x[1] - x[0]\} / T_0$ , или в общем виде

$$x'(t) = \{x[i] - x[i-1]\} / T_0. \quad (8)$$

Погрешность дифференцирования для разностного уравнения (8) будет равна  $k_1'(iT_0) = T_0 x''(\xi) / 2$ .

Применив Z-преобразование к разностному уравнению (8), получим  $x'[z] = k_0 x(z)(1-z^{-1}) / T_0$ . Тогда дискретная передаточная функция устройства дифференцирования будет иметь вид

$$D(z) = k_0(1-z^{-1}) / T = b_0(1-z^{-1}), \quad (9)$$

где  $b_0 = k_0 / T$ .

На рис. изображена структурная схема алгоритма программной реализации дискретной передаточной функции. Сигнал  $x'(t)$  будет изменяться по закону

$$\begin{cases} x'[0] = 0 \\ x'[1] = k_0 x[1] / T_0 \\ x'[2] = k_0 \{x[2] - x[1]\} / T_0 \\ \dots\dots\dots \\ x'[n] = k_0 \{x[n] - x[n-1]\} / T_0 \end{cases}.$$

С учетом задержки  $\tau$  вносимой устройством дифференцирования при реализации алгоритма

$$D(z) = b_0(1-z^{-1})e^{-\tau}, \text{ а при } \tau = T_0 \\ D(z) = k_0(1-z^{-1})z^{-1}.$$

## Частотные характеристики устройства дифференцирования

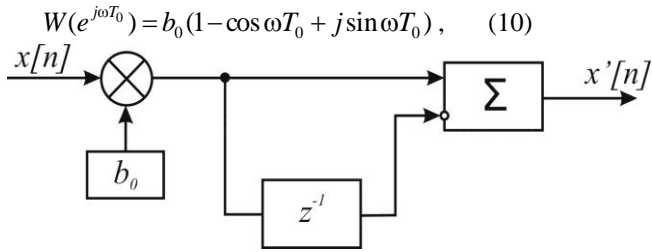


Рис. - Структурная схема программной реализации дискретных передаточных функций

Модулем (10) является

$$|W(e^{j\omega T_0})| = b_0 \sqrt{(1 - \cos \omega T_0)^2 + \sin^2 \omega T_0}. \quad (11)$$

Если учесть запаздывание на  $\tau = T_0$

$$W(e^{j\omega T_0}) = b_0[(\cos \omega T_0 - \cos 2\omega T_0) - j(\sin \omega T_0 - \sin 2\omega T_0)].$$

Если расчет дифференцирующего устройства произвести для  $n=2$ , то имеем

$$L_2(t) = \sum_{i=0}^2 (-1)^{2-i} x[i] / [i!(2-i)!] \cdot q^3 / (q-i),$$

$$x'(t) = \frac{1}{T_0} \left\{ \frac{1}{2} x[0](2q-3) - x[1](2q-2) + \frac{1}{2} x[2](2q-1) \right\}, \quad (12)$$

в частности для первой производной  $x'[iT_0]$ , ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) получается

$$\begin{cases} x'[0] = \frac{1}{2T_0} (-3x[0] + 4x[1] - x[2]) \\ x'[1] = \frac{1}{2T_0} (-3x[0] + x[2]) \\ x'[2] = \frac{1}{2T_0} (x[0] - 4x[1] + 3x[2]) \end{cases} \quad (13)$$

В общем случае разностные уравнения (13) можно записать в виде

$$\begin{cases} x'[i] = k_0(-3x[i] + 4x[i+1] - x[i+2]) / 2T \\ x''[i] = k_0(-x[i-1] + x[i+1]) / 2T \\ x'''[i] = k_0(x[i-2] - 4x[i-1] + 3x[i]) / 2T \end{cases}, \quad (14)$$

из выражения (14) можно получить передаточные функции алгоритма дифференцирования

$$\begin{cases} D'[z] = x'(z) / x(z) = k_0(-3 + 4z^{+1} - z^{+2}) / 2T \\ D''[z] = x''(z) / x(z) = k_0(-z^{-1} + z^1) / 2T \\ D'''[z] = x'''(z) / x(z) = k_0(z^{-2} - 4z^{-2} + 3z) / 2T \end{cases}.$$

Для программной реализации алгоритмов цифрового дифференцирования в реальном масштабе времени надо использовать  $D'''[z]$ , поскольку в ней используется предыдущие значения решетчатой функции входного сигнала в моменты времени  $(i-2)$ ,  $(i-1)$ , а не в последующие  $(i+2)$ ,  $(i+1)$ , как в  $D'[z]$ . В дискретную передаточную функцию  $D'''[z]$  вводится дополнительное запаздывание на один такт, так как в реальном масштабе времени в момент  $iT_0$  нет значения входного сигнала  $x[i+1]$  в момент времени  $(i+1)T_0$ . Тогда  $D'''[z]$  принимает вид  $D'''[z] = \frac{k_0}{2T}(1-z^{-2})$ . Величина  $x'''[n]$  несет информацию о поломке зуба ЗК.

**Выводы.** Предложены три метода обработки выходных сигналов датчика частоты вращения: метод, основанный на анализе средней скорости вращения ЗК; метод числового дифференцирования выходных сигналов датчика частоты вращения и метод аппаратного анализа характеристики сигналов датчика.

**Список литературы:** 1. Яковенко В.В. Магнитные датчики механических величин / В.В. Яковенко // Датчики и методы повышения их точности. Учеб. пособие. – К.: Вища школа, 1989. – с. 57-109. 2. Шрюфер Э. Обработка сигналов: цифровая обработка дискретных сигналов / Э. Шрюфер // Под ред. В.Б. Бабасе. – К.: Лето 96.–1995. –320 с.

*Надійшла до редколегії 30.04.2013*

УДК 621.318

**Определение дефекта зубчатого колеса с помощью датчика частоты вращения / Сиан Талиб, С. Н. Швец, В. В. Яковенко** // Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 37–42. – Бібліогр.: 2 назв.

Пропонуються способи аналізу вихідних сигналів датчика частоти обертів при визначенні дефектів зубчатого колеса з оцінкою їх ефективності.

**Ключові слова:** дефект, зубчате колесо, швидкість обертання, обробка, дискретні функції.

Methods of the analysis of output signals sensor of rotating speed are offered in case of identification cogwheel defects with an assessment of their efficiency.

**Keywords:** defect, cogwheel, rotational speed, processing, the discrete functions.