



заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: livnet@list.ru

Prof., of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: livnet@list.ru

Для цитирования

Александров А. А. Определение коэффициента теплоотдачи при производстве маложестких деталей / А. А. Александров, А. В. Лившиц // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 58, № 2. - С. 34-40. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).34-40

For citation

Aleksandrov A. A., Livshits A. V. Opredelenie koeffitsienta teplootdachi pri proizvodstve malozhestkikh detalei [Definition of the heat transfer coefficient in the production of low-rigidity parts]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2018, Vol. 58, No. 2, pp. 34-40. DOI: DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).34-40

УДК 62-25

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).40-45

Н. А. Пшеничникова, В. А. Ильных, В. Ю. Линейцев

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

Дата поступления: 3 мая 2018 г.

КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ ДЕТАЛЕЙ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация. В статье ставится задача проанализировать результаты замеров отклонений погрешности формы детали типа «конический вал» на примере конической оправки NSK 30-27. Детали указанной формы могут быть изготовлены и в дальнейшем применены в соединениях, передающих крутящий момент, в качестве вспомогательных оправок, которые работают в условиях многократной автоматизированной сборки и разборки в различных механизмах.

На основе предварительной статистической оценки погрешности формы проведены замеры погрешности формы конического вала, определены дисперсия и среднеквадратическое отклонение измерений. В дальнейшем вычислены значения корреляционной функции отклонений радиус-вектора профиля конического вала, нормированной корреляционной функции значения функции $\xi(x)$ и построен ее график. Для случайной корреляционной функции погрешности формы определен спектральный состав и проведено распределение дисперсий по частотам. При этом применена методика разложения случайной корреляционной функции в ряд Фурье только четных (косинусных) гармоникам. В результате проведенного спектрального анализа установлены величины дисперсий для гармоник от 0 до 6, наиболее часто исследуемых на практике в машиностроении.

На основе этих результатов появляется возможность создать математические модели формы охватываемой и охватывающей деталей профильного соединения типа «вал – втулка» с учетом погрешности формы и имитационную модель сопряжения деталей конического соединения для моделирования многократной автоматизированной сборки и разборки в различных механизмах.

Ключевые слова: стационарный случайный процесс, погрешность формы, математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, корреляционная матрица, нормированная корреляционная функция.

N. A. Pshenichnikova, V. A. Il'nykh, V. Yu. Lineitsev

Zabaikalsky Institute of Railway Transport, Chita, the Russian Federation

Received: May 3, 2018

CORRELATION-SPECTRAL ANALYSIS OF THE ERROR OF THE FORM OF THE DETAILS OF PROFILE CONNECTIONS

Abstract. The aim of the article is to analyze the results of measuring deviations of the error in the shape of a «conical shaft» type part using the example of a conical mandrel NSK 30-27. The details of this shape can be made and later applied to connections that transmit torque as auxiliary mandrels operating under conditions of multiple automated re-assembly and disassembly in various mechanisms.

Based on a preliminary statistical evaluation of the shape error, measurements of the error in the shape of the conical shaft were made, with the dispersion and standard deviation of the measurements being determined. In the following, the values of the correlation function of the deviations of the radius vector of the profile of the conical shaft, the normalized correlation function, and the value of the function $\xi(x)$ are calculated and its graph is constructed. For the random correlation function of the error of the shape, the spectral composition is determined and the variances are distributed by frequencies. In this case, the technique of expanding the random correlation function into a Fourier series is used, using only the even (cosine) harmonics. As a result of the spectral analysis, the variance values for harmonics from 0 to 6, most often studied in practice in mechanical engineering, are established.

On the basis of these results, it is possible to create mathematical models of the shape of the male and female parts of a profile connection of the shaft-bushing type (with allowance for the shape error) and the simulation model of conjugation of conical joint parts for modeling of the reusable automated assembly and disassembly in various mechanisms.

Keywords: stationary random process, shape error, mathematical expectation, variance, standard deviation, correlation matrix, normalized correlation function.

Введение

«На практике очень часто встречаются случайные процессы, протекающие во времени приблизительно однородно и имеющие вид непрерывных случайных колебаний вокруг некоторого среднего значения, причем ни средняя амплитуда, ни характер этих колебаний не обнаруживают существенных изменений с течением времени, такие случайные процессы называются *стационарными*» [1, 2].

Стационарные случайные процессы очень часто встречаются в различных физических и технических задачах.

Проведение корреляционного анализа

В качестве примера рассмотрим образец приблизительно стационарного случайного процесса отклонений радиус-вектора контурной кривой профиля детали (от идеальной формы) в результате воздействия на результаты случайных и систематических факторов. Опираясь на результаты теоретических исследований проведенных в работах [1-2] и методику исследований [3-18] проведем корреляционный анализ.

Применяя способ построения поверхности по сечениям на основании результатов замеров оправок [7], предлагаем следующий порядок расчета (лучи в сечениях определены через $\varphi = 10^\circ$).

Случайная функция погрешности формы может быть сведена к системе тридцати шести случайных величин, отвечающих сечениям $\varphi=0; 10... 350$. Всего в ходе эксперимента было произведено 50 реализаций. Результаты замеров представлены в табл. 1 (фрагмент).

Т а б л и ц а 1

Результаты замеров погрешности формы, мкм (на примере оправки NSK 30-27)

| | | | | | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | ... | 350 |
| 1 | 0,0 | -1,0 | -2,0 | -2,0 | -2,0 | -3,0 | -3,0 | -4,0 | -6,4 | ... | 0,5 |
| 2 | -0,2 | -0,5 | -1,5 | -3,0 | -4,0 | -4,5 | -5,0 | -7,0 | -7,0 | ... | 1,0 |
| 3 | -0,2 | -1,0 | -1,5 | -3,0 | -4,0 | -5,0 | -5,0 | -5,9 | -6,0 | ... | 1,0 |
| 4 | -0,2 | -0,5 | -1,7 | -2,2 | -2,3 | -4,3 | -4,5 | -4,2 | -7,0 | ... | 0,8 |
| 5 | -0,2 | -0,8 | -2,0 | -2,7 | -2,7 | -4,3 | -3,2 | -6,7 | -6,2 | ... | 0,5 |
| 6 | 0,0 | -0,5 | -1,9 | -2,1 | -2,9 | -4,1 | -4,9 | -4,9 | -6,8 | ... | 0,6 |
| 7 | -0,1 | -0,8 | -1,8 | -2,9 | -2,9 | -4,9 | -4,0 | -4,2 | -6,3 | ... | 0,9 |
| 8 | -0,2 | -0,7 | -1,7 | -2,9 | -2,1 | -3,7 | -3,0 | -6,5 | -7,0 | ... | 0,6 |
| 9 | -0,1 | -0,8 | -1,5 | -2,3 | -3,6 | -3,3 | -4,5 | -5,1 | -7,0 | ... | 0,8 |
| 10 | -0,1 | -0,7 | -1,7 | -2,3 | -3,1 | -4,2 | -3,1 | -4,0 | -6,1 | ... | 1,0 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 50 | -0,2 | -0,7 | -1,8 | -2,4 | -2,6 | -3,4 | -4,4 | -5,1 | -6,7 | ... | 0,5 |

Далее найдем оценки для характеристик случайных величин $X(0), X(10), \dots, X(350)$. Для этого просуммируем значения по столбцам и разделим сумму на число реализаций $n = 50$, определим приближенно зависимость математического ожидания от угла. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Зависимость математического ожидания погрешностей измерений от угла, мкм

| | | | | | | | | | |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Угол φ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| $m_x(\varphi)$ | -0,1 | -0,8 | -1,7 | -2,5 | -2,9 | -4 | -4 | -5,9 | -6,4 |
| Угол φ | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 |
| $m_x(\varphi)$ | -6,5 | -6,5 | -6,1 | -5,5 | -4,4 | -3,3 | -2,2 | -1,2 | 0,5 |
| Угол φ | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 |
| $m_x(\varphi)$ | 1,6 | 2,2 | 4,2 | 4,7 | 4,7 | 5,3 | 5,8 | 5,9 | 6,5 |
| Угол φ | 270 | 280 | 290 | 300 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 |
| $m_x(\varphi)$ | 8,3 | 8,5 | 9 | 8,1 | 7 | 5,3 | 2,9 | 1,8 | 0,8 |

Оценку для элементов корреляционной матрицы, а именно: дисперсий и корреляционных моментов, будем производить следующим образом.

Для вычисления статистической дисперсии суммируются квадраты чисел, стоящих в соответствующем столбце; сумма делится на $n = 50$; из результата вычитается квадрат соответствующего математического ожидания. Для получения несмещенной оценки результат умножается на поправку $\frac{n}{n-1} = \frac{50}{49}$.

Аналогично оцениваются корреляционные моменты. Для вычисления статистического момента, отвечающего двум заданным сечениям, перемножаются числа, стоящие в соответствующих столбцах; произведения складываются алгебраически; полученная сумма делится на $n=50$; из результата вычитается произведение соответствующих математических ожиданий; для получения несмещенной оценки корреляционного момента результат умножается на $\frac{n}{n-1}$.

Полученная таким образом корреляционная матрица системы случайных величин $X(0), X(10), \dots, X(350)$ – она же таблица значений корреляционной функции $K_x(\varphi, \varphi')$ – приведена в табл. 3 (фрагмент).

Извлекая из величин дисперсии квадратные корни, найдем зависимость среднеквадратического отклонения измерений σ_x от угла (табл. 4).



Т а б л и ц а 3
Значения корреляционной функции (мм²)
 $K_x(\varphi, \varphi') \cdot 10^{-9}$

| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 7,69 | 0,55 | 0,25 | 2,69 | -6,66 | -1,01 | -2,69 | 10,2 | -3,99 | -0,87 |
| 10 | | 35,0 | 5,96 | 4,73 | -10,3 | 4,29 | 5,89 | 7,76 | -1,54 | -14,9 |
| 20 | | | 32,8 | 6,84 | -1,24 | 4,10 | -49,9 | 5,20 | -0,69 | 10,5 |
| 30 | | | | 116,0 | 53,4 | 53,5 | 27,3 | 43,0 | -1,31 | -3,18 |
| 40 | | | | | 395,0 | 149,0 | 139,0 | 133,0 | 8,34 | 14,8 |
| 50 | | | | | | 428,0 | -16,6 | 97,0 | -54,6 | 6,79 |
| 60 | | | | | | | 416,0 | -72,0 | 41,0 | -31,0 |
| 70 | | | | | | | | 821,0 | 54,1 | -10,4 |
| 80 | | | | | | | | | 95,4 | -11,6 |
| 90 | | | | | | | | | | 93,1 |

Т а б л и ц а 4

Зависимость среднеквадратического отклонения σ_x погрешностей (мкм) от угла

| Угол φ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\sigma_x(\varphi)$ | 0,09 | 0,19 | 0,18 | 0,34 | 0,63 | 0,65 | 0,64 | 0,91 | 0,31 |
| Угол φ | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 |
| $\sigma_x(\varphi)$ | 0,31 | 0,35 | 0,19 | 0,33 | 0,12 | 0,17 | 0,15 | 0,14 | 0,3 |
| Угол φ | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 |
| $\sigma_x(\varphi)$ | 0,1 | 0,45 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,43 | 0,49 | 0,38 | 0,31 |
| Угол φ | 270 | 280 | 290 | 300 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 |
| $\sigma_x(\varphi)$ | 1,22 | 1,53 | 1,33 | 1,11 | 0,6 | 0,84 | 0,62 | 0,19 | 0,17 |

Деля значения, стоящие в табл. 3, на произведения соответствующих среднеквадратических отклонений, получим значения нормированной корреляционной функции $r_x(\varphi, \varphi')$ (табл. 5, фрагмент) [19].

Т а б л и ц а 5

Значения нормированной корреляционной функции $r_x(\varphi, \varphi')$

| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|----|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 1,00 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,00 | -0,01 | 0,01 | -0,04 | -0,01 |
| 10 | | 1,00 | 0,18 | 0,04 | -0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | -0,02 | -0,16 |
| 20 | | | 1,00 | 0,06 | 0,00 | 0,01 | -0,12 | 0,01 | -0,01 | 0,11 |
| 30 | | | | 1,00 | 0,14 | 0,12 | 0,07 | 0,05 | -0,01 | -0,03 |
| 40 | | | | | 1,00 | 0,35 | 0,33 | 0,16 | 0,09 | 0,16 |
| 50 | | | | | | 1,00 | -0,04 | 0,12 | -0,57 | 0,07 |
| 60 | | | | | | | 1,00 | -0,09 | 0,43 | -0,33 |
| 70 | | | | | | | | 1,00 | 0,57 | -0,11 |
| 80 | | | | | | | | | 1,00 | -0,12 |
| 90 | | | | | | | | | | 1,00 |

Перейдем к построению нормированной корреляционной функции того стационарного процесса, которым можно заменить случайную функцию $X(\varphi)$.

Для стационарного процесса корреляционная функция и нормированная корреляционная функция зависят только от $\tau = \varphi' - \varphi$, следовательно, при постоянном значении τ корреляционная функция должна быть постоянной. Усредняя оценки нормированной корреляционной функции вдоль параллелей главной диагонали, получим значения нормированной корреляционной функции $\xi_x(\tau)$ (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Значения функции $\xi_x(\tau)$

| φ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\xi_x(\tau)$ | 1 | 0,107584 | 0,077361 | 0,000265 | 0,084557 | 0,195550 |
| φ | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
| $\xi_x(\tau)$ | 0,087190 | 0,033627 | -0,135293 | 0,033291 | 0,089082 | 0,035113 |
| φ | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 |
| $\xi_x(\tau)$ | -0,045868 | 0,022562 | -0,026991 | 0,092475 | -0,052258 | -0,066595 |
| φ | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 |
| $\xi_x(\tau)$ | 0,003252 | -0,049507 | -0,020946 | -0,017819 | -0,000790 | -0,064002 |
| φ | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 |
| $\xi_x(\tau)$ | -0,020800 | -0,052906 | 0,027888 | -0,111832 | -0,063243 | -0,136858 |
| φ | 300 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 |
| $\xi_x(\tau)$ | -0,329785 | -0,018818 | -0,091921 | -0,003336 | 0,091856 | -0,133404 |

График нормированной корреляционной функции $\xi_x(\tau)$ представлен на рис. 1.

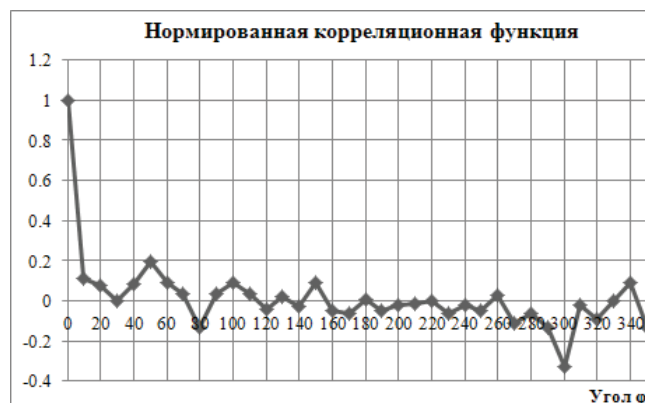


Рис. 1. График нормированной корреляционной функции погрешности формы профильных деталей

При рассмотрении графика обращает на себя внимание наличие для некоторых τ отрицательных значений корреляционной функции. Это указыва-



ет на то, что в структуре случайной функции имеется некоторый элемент периодичности [1, 2].

Такой характер корреляционной функции, с переходом на отрицательные значения, очень часто встречается на практике. Обычно в таких случаях по мере увеличения τ амплитуда колебаний корреляционной функции уменьшается и при дальнейшем увеличении τ корреляционная функция стремится к нулю.

Из полученных результатов можно непосредственно перейти к спектральному составу случайной функции [1, 2]. Так, спектр стационарной случайной функции будет описывать распределение дисперсий по различным частотам.

В процессе исследования рассмотрена случайная функция на интервале $(0; T)$.

Пусть задана случайная корреляционная функция случайной функции $X(\varphi)$

$$K_x(\varphi, \varphi + \tau) = \kappa_x(\tau) \quad (1)$$

Функция $K_x(\tau)$ есть четная функция:

$$K_x(\tau) = K_x(-\tau) \quad (2)$$

При изменении φ и φ' от 0 до T аргумент $\tau = \varphi' - \varphi$ изменяется от $-T$ до $+T$.

Как известно, четную функцию на интервале $(-T; T)$ можно разложить в ряд Фурье, пользуясь только четными (косинусными) гармониками [1, 2]:

$$K_x(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} D_k \cos \omega_k \tau, \quad (3)$$

где $\omega_k = k\omega_1$; $\omega_1 = \frac{2\pi}{2T} = \frac{\pi}{T}$, а коэффициенты D_k определяются формулами [15, 16]:

$$D_0 = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T k_x(\tau) d\tau \quad (4)$$

$$\text{и } D_k = \frac{1}{T} \int_{-T}^T k_x(\tau) \cos \omega_k \tau d\tau \text{ при } k \neq 0. \quad (5)$$

Дисперсия случайной функции $X(\varphi)$, заданной спектральным разложением, будет равна [1, 2]:

$$D_x = D[X(\varphi)] = \sum_{k=0}^{\infty} (\cos^2 \omega_k \varphi + \sin^2 \omega_k \varphi) D_k. \quad (6)$$

При этом также выполняется равенство

$$D_x = \sum_{k=0}^{\infty} D_k. \quad (7)$$

Проведенный спектральный анализ позволяет установить величины дисперсий для гармоник от 0 до 6, наиболее часто исследуемых на практике в машиностроении.

Заключение

1. В результате статистического анализа установлено, что нормированная корреляционная функция отклонений погрешности формы имеет элемент периодичности.

2. В результате спектрального анализа установлено, что величины дисперсий отклонений погрешности формы лежат в пределах от 1 до 0,025 мм для разных гармоник.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зенин Н.В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночных соединений в условиях серийного производства : дис. канд. техн. наук. М., 2007. 132 с.
2. Ильиных В.А., Косов М.Г. Оценка влияния конструктивных параметров на напряженное состояние стыков РК - профильных соединений поляризационно-оптическим методом // Вестник машиностроения. 1990. № 11. С. 64–66.
3. Ильиных В.А., Новосельский М.И. Выбор и назначение радиального зазора в профильном соединении с равно-осным контуром // Станки и инструменты. 1985. № 12. С. 26–27.
4. Ильиных В.А. Анализ результатов статистической оценки посадочных поверхностей вспомогательного инструмента многоцелевого станка ВЗ-20 // Технология, экономика, педагогика : межвуз. сб. науч. тр. Чита : Изд-во ЗабГПУ, 1998. С. 43–46.
5. Рожкова Е.А., Ильиных В.А., Линейцев В.Ю. Расчет на прочность РК-3-профильных соединений с натягом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2. С. 17–20.
6. Свидетельство 5948. Моделирование сопряжения деталей конического соединения / Линейцев В.Ю., Ильиных В.А., Лукьянов П.Ю. ; зарегистрировано. 30.03.2006.
7. Линейцев В.Ю., Ильиных В.А. Имитационное моделирование деталей конического соединения на основе РК-3 профильных кривых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 51–55.
8. Ильиных В.А. Расчет и выбор конструктивных параметров профильных соединений с равноосным контуром : дис. ... канд. техн. наук. М., 1987. 185 с.
9. Максютин А.М., Линейцев В.Ю. Обработка результатов имитационного моделирования сопряжения РК-3 профильных конических поверхностей // Молодой ученый. 2016. № 26 (130). С. 58–63.
10. Линейцев В.Ю. Контактная прочность, жесткость и точность разъемных неподвижных конических соединений в инструментальных системах : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2006.



11. Ильиных В.А., Линейцев В.Ю., Рожкова Е.А. Расчет напряженно-деформированного состояния ступицы с РК-профильным отверстием // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 3. С. 69–73.
12. Пат. 155119 Рос. Федерация. Модифицированное профильное моментопередающее соединение вал-ступица с равноосным контуром с натягом / В.А. Ильиных, Е.А. Рожкова, В.Ю. Линейцев.
13. Линейцев В.Ю., Ильиных В.А., Ярилов В.Е. Исследование конических РК-3 профильных соединений на точность и жесткость // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 36–39.
14. Линейцев В.Ю., Ильиных В.А. Учет износа при имитационном моделировании сборки РК-3 профильных конических соединений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 26–30.
15. Ильиных В.А. Статистическая оценка погрешности формы конических валов (на примере оправки NSK 30-27) / Ильиных В.А., Пшеничникова Н.А. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Восьмой Междунар. науч. практ. конф. Т. 1. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2017. С. 431–435.
16. Линейцев В.Ю., Ильиных В.А., Осипова Т.К. Влияние скорости сборки на динамику движения конуса в отверстии втулки // 115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье: Образование–Наука–Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Т. 1. Чита : Изд-во ЗаБИЖТ, 2017. С. 166–172.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М. : Физматгиз, 1962. 564 с.
18. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М. : КНОРУС, 2011. 448 с.
19. Кузьмин С.В. Нормированная корреляционная функция для анализа сигналов с разной частотой дискретизации // Информационные технологии. 2011. Т. 9. № 4. С. 19–23.

REFERENCES

1. Zenin N.V. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva trekhgrannogo profilya besshponochnykh soedinenii v usloviyakh seriinogo proizvodstva: dis. kand. tekhn. nauk: 05.02.08 [Technological quality assurance of the trihedral profile of the keyless connections in conditions of batch production. Ph.D. (Engineering) thesis: 05.02.08]. Moscow: Bauman MSTU, 2007, 132 p.
2. Il'nykh V.A., Kosov M.G. Otsenka vliyaniya konstruktivnykh parametrov na napryazhennoe sostoyanie stykov RK - profil'nykh soedinenii polarizatsionno-opticheskim metodom [Estimation of the influence of design parameters on the stress state of joints of RC - profile compounds by the polarization-optical method]. *Vestnik mashinostroeniya [Russian Engineering Research]*, No. 11. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990, pp. 64-66.
3. Il'nykh V.A., Novosel'skii M.I. Vybór i naznachenie radial'nogo zazora v profil'nom soedinenii s ravnoosnym konturom [Selection and designation of a radial clearance in a profile connection with an equiaxial contour]. *Stanki i instrumenty [Machines and Instruments]*, No. 12. Moscow: Mashinostroenie, 1985, pp. 26-27.
4. Il'nykh V.A. Analiz rezul'tatov statisticheskoi otsenki posadochnykh poverkhnostei vspomogatel'nogo in-strumenta mnogotselovogo stanka BZ-20 [Analysis of the results of the statistical estimation of the landing surfaces of the auxiliary tool of the multipurpose machine BZ-20]. *Mezh. vuz. sbornik nauchnykh trudov «Tekhnologiya, ekonomika, pedagogika» [Intern. university collection of scientific works "Technology, Economics, Pedagogics"]*. Chita: ZabGPU Publ., 1998, pp.43-46.
5. Rozhkova E.A., Il'nykh V.A., Lineitsev V.Yu. Raschet na prochnost' RK-3-profil'nykh soedinenii s natygom [Calculation of the strength of RC-3-profile pressure couplings]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2012, No. 2, pp. 17-20.
6. Lineitsev V.Yu., Il'nykh V.A., Luk'yanov P.Yu. *Modelirovanie sopryazheniya detalei konicheskogo soedineniya [Modeling of conjugation of conical joints]*. Certificate of industrial registration of the computer program. No. 5948 dated Mar 30, 2006.
7. Lineitsev V.Yu., Il'nykh V.A. Imitatsionnoe modelirovanie detalei konicheskogo soedineniya na osnove RK-3 profil'nykh krivykh [Simulation modeling of details of conical connection on the basis of RK-3 profile curves]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2015, No. 2 (46), pp. 51-55.
8. Il'nykh V.A. Raschet i vybor konstruktivnykh parametrov profil'nykh soedinenii s ravnoosnym konturom: Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk: 05.02.02 [Calculation and selection of structural parameters of profile joints with an equiaxial contour. Ph.D. (Engineering) thesis: 05.02.02]. Moscow: MVTU Publ., 1987, 185 p.
9. Maksyutin A.M., Lineitsev V.Yu. Obrabotka rezul'tatov imitatsionnogo modelirovaniya sopryazheniya RK-3 profil'nykh konicheskikh poverkhnostei [Processing results of simulation simulation of coupling RK-3 of profile conical surfaces]. *Molodoi uchenyi [Young scientist]*, 2016, No. 26 (130), pp. 58-63.
10. Lineitsev V.Yu. Kontaknaya prochnost', zhestkost' i tochnost' raz'emnykh nepodviznykh konicheskikh soedinenii v instrumental'nykh sistemakh. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhn. nauk [Contact strength, stiffness and accuracy of detachable fixed conical joints in tool systems. Ph.D. (Engineering) thesis]. Irkutsk, 2006.
11. Il'nykh V.A., Lineitsev V.Yu., Rozhkova E.A. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stupitsy s RK-profil'nym otverstiem [Calculation of the stress-strain state of the hub with the RK shaped hole]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2010, No. 3, pp. 69-73.
12. Il'nykh V.A., Rozhkova E.A., Lineitsev V.Yu. *Modifitsirovannoe profil'noe momentopereadayushchee soedinenie val-stupitsa s ravnoosnym konturom s natygom. [Modified profile moment transfer coupling shaft-hub with an equiaxial contour with interference]*. Patent for utility model No. 155119, State Register of Utility Models.
13. Lineitsev V.Yu., Il'nykh V.A., Yarirov V.E. Issledovanie konicheskikh RK-3 profil'nykh soedinenii na tochnost' i zhestkost' [The study of conical RC-3 profile joints on the accuracy and rigidity]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2017, No. 1 (53), pp. 36-39.
14. Lineitsev V.Yu., Il'nykh V.A. Uchet iznosa pri imitatsionnom modelirovanii sborki RK-3 profil'nykh konicheskikh soedinenii [Accounting for wear during simulation simulation of assembly RK-3 of profile conical connections]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2017, No. 2 (54), pp. 26-30.
15. Il'nykh V.A., Pshenichnikova N.A. Statisticheskaya otsenka pogreshnosti formy konicheskikh valov (na primere opravki NSK 30-27) [Statistical estimation of the error of the shape of conical shafts (by the example of the mandrel NSK 30-27)]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy Vos'moi Mezhdunarodnoi nauchno – prakticheskoi konferentsii, 28 marta – 01 aprelya*



2017 g. v 2 t [Transport infrastructure of the Siberian region: materials of the Eighth International Scientific and Practical Conference, March 28 - April 1, 2017 in 2 volumes]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2017, Vol. 1, pp. 431-435.

16. Lineitsev V.Yu., Il'nykh V.A., Osipova T.K. Vliyaniye skorosti sborki na dinamiku dvizheniya konusa v otverstii vtulki [Effect of assembly speed on the dynamics of cone motion in the bushing bore]. 115 let zhelezнодорожному obrazovaniyu v Zabaikal'e: Obrazovanie - Nauka - Proizvodstvo. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [115 years of railway education in Transbaikalia: Education - Science - Production. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference], Vol. 1, ZabIZhT Publ., 2017, pp. 166-172.

17. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostei [Probability theory]. State publishing house of physical and mathematical literature, Moscow, 1962.

18. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya: uchebnoe posobie [Theory of random processes and its engineering applications: a reference book]. 5-th ed., repr. Moscow: KNORUS Publ., 2011, 448 p.

19. Kuz'min S.V. Normirovannaya korrelyatsionnaya funktsiya dlya analiza signalov s raznoi chastotoi diskretizatsii [Normalized correlation function for analyzing signals with different sampling frequency]. Infokommunikacionnye tehnologii, 2011, Vol. 9, No. 4, pp. 19-23.

Информация об авторах

Пшеничникова Надежда Анатольевна - ст. преподаватель кафедры «Высшая математика и прикладная информатика», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: starka_nadya@mail.ru

Ильиных Виктор Анатольевич - к. т. н., доцент кафедры «Научно-инженерные дисциплины», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

Линейцев Владимир Юрьевич - к. т. н., доцент кафедры «Строительство железных дорог», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: Linetzev@mail.ru

Для цитирования

Пшеничникова Н. А. Корреляционно-спектральный анализ погрешности формы деталей профильных соединений / Н. А. Пшеничникова, В. А. Ильиных, В. Ю. Линейцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 58 № 2. - С. 40-45. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).40-45

Authors

Pshenichnikova Nadezhda Anatol'evna – Asst. Prof., Subdepartment of Higher Mathematics and Applied Informatics, Zabaikalsky Institute of railway transport, Chita, e-mail: starka_nadya@mail.ru

Il'nykh Viktor Anatol'evich – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., the subdepartment of Scientific and Engineering Disciplines, Zabaikalsky institute of railway transport, Chita, e-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

Lineitsev Vladimir Yur'evich – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., the subdepartment of Construction of Railways, Zabaikalsky institute of railway transport, Chita, e-mail: Linetzev@mail.ru

For citation

N. A. Pshenichnikova, V. A. Il'nykh, V. Yu. Lineitsev. Korrelyatsionno-spektral'nyi analiz pogreshnosti formy detalei profil'nykh soedinenii [Correlation-spectral analysis of the error of the form of the details of profile connections]. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies, System Analysis, Modeling], 2018, Vol. 58, No. 2, pp. 40-45. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).40-45.

УДК 004.896

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).45-56

В. С. Тынченко, В. Е. Петренко, А. В. Милов, А. В. Мурыгин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация

Дата поступления: 22 мая 2018 г.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ

Аннотация. В статье решается проблема разработки интеллектуальной системы управления процессом индукционной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов. Предложена концепция системы управления, в рамках которой в качестве решения предлагается использование методов нечеткой логики. Построена обобщенная схема интеллектуальной автоматизированной системы индукционной пайки, формирующей управление на основе рассогласования температур и скоростей нагрева спаиваемых элементов волноводной сборки, а также оценки качества управления процессом пайки по сигналу рассогласования температур и скоростей нагрева. В качестве выходных параметров работы интеллектуальной системы предложен выбор алгоритма управления, а также величина корректировки коэффициентов регуляторов. По результатам экспертной оценки составлены термы входных и выходных переменных. Предложенный алгоритм управления реализован в рамках действующей автоматизированной системы управления пайкой волноводных трактов космических аппаратов. По результатам проведения численных экспериментов были подобраны как формы управляющих воздействий в системе, так и их параметры. Предложенный подход к формированию управления был апробирован в серии натуральных экспериментов по пайке волноводных трактов, в результате которых были получены графики нагрева элементов изделия, по которым можно судить об эффективности использования интеллектуального управления на базе нечеткого регулятора. Применение предложенного подхода позволяет обеспечить высокое качество регулирования процесса индукционного нагрева и получить надежные неразъемные соединения элементов волноводных трактов.

Ключевые слова: индукционный нагрев, волноводный тракт, нечеткая логика, технологический процесс, пайка, интеллектуальная система.