

УДК 519.233.5

В.И. Коваленко, канд. техн. наук, доц., **М.В. Меркулов**, ассист.,
И.П. Мазур, **Н.А. Хмиров**
Донецкий национальный технический университет, Украина
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СОПРЯЖЕНИЯ ВАЛ-ШАТУН

В статье приведена методика корреляционного анализа на примере сопряжения внутренних и наружных поверхностей пары вал-шатун. Приведена схема сопрягаемых поверхностей. Представлены экспериментальные данные отклонений от номинального диаметра отверстий после чистовой и черновой обработок, а также результаты анализа по трем параметрам сопряжения (минимальное, максимальное и среднее отклонения от номинального размера диаметра шатуна). Проанализирована зависимость зазора пары вал-шатун от точности сопрягаемых поверхностей, построена диаграмма рассеивания одного из исследуемых параметров. В результате проведенного корреляционного анализа установлено, что величина зазора между поверхностями вала и шатуна в большей степени зависит от точности обработки отверстия шатуна, чем от точности обработки поверхности вала.

Ключевые слова: корреляция, зазор, точность, вал, шатун.

Введение

В заводских условиях проводилось исследование обработки поверхностей деталей типа вал и шатун. Эти детали входят в сопряжение вал-шатун, которое является одним из наиболее ответственных при сборке поршневого герметичного компрессора. В работе [1] выполнена оценка стабильности технологического процесса отделочной обработки поверхностей сопряжения вал-шатун. В настоящей работе продолжено исследование указанного сопряжения с использованием корреляционного анализа.

Целью работы является применение метода корреляционного анализа [2-4] для выявления факторов, влияющих на точность обработки внутренней цилиндрической поверхности шатуна, а также поиск взаимосвязей между зазором и размерами сопрягаемых поверхностей шатуна и вала. В работе [5] с помощью этого метода проанализирована обработка внутренних поверхностей втулок. Корреляционный метод анализа позволяет выявить существующую взаимосвязь между параметрами и исследуемыми факторами.

Основное содержание и результаты работы

2.1 Корреляционный анализ значений отклонений диаметра отверстия, обработанного на чистовой и черновой операциях.

Для выявления взаимосвязи между параметрами и факторами в работе используется один из широко применяемых методов оценки статистических связей - корреляционный анализ. Этот метод позволяет ответить на вопросы: влияет ли данная величина (фактор) на выходную величину (параметр) и какова степень (теснота) связи между этими величинами?

На рис.1 представлена схема исследуемого сопряжения вал-шатун. Цифрами обозначены: 1 - эксцентриковый вал (диаметр спрягаемой поверхности d), имеющий эксцентриситет e , 2 - шатун (диаметр отверстия D).

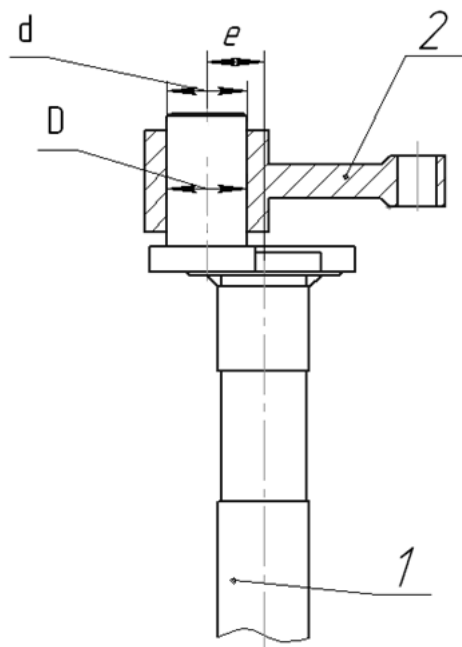


Рис. 1. Схема сопряжения вал-шатун

Корреляционный анализ проводился для следующих взаимосвязей:

$$K_1=f(D_{2min}; D_{1min}), K_2=f(D_{2max}; D_{1max}), K_3=f(D_{2cp}; D_{1cp}),$$

где K_1 – взаимосвязь между минимальными отклонениями от номинального диаметра отверстия, обработанного на чистовой (D_{2min}) и черновой (D_{1min}) операциях; K_2 и K_3 – соответственно взаимосвязи между максимальными и средними отклонениями от номинального диаметра отверстия, обработанного на чистовой и черновой операциях.

В данной работе факторами являются значения D_{1min} , D_{1max} и D_{1cp} (минимальное, максимальное и среднее отклонения от номинального диаметра отверстия шатуна после чернового хонингования), а выходными параметрами - значения D_{2min} , D_{2max} и D_{2cp} (минимальное, максимальное и среднее отклонения от номинального диаметра отверстия шатуна после чистового хонингования).

В табл.1 (в качестве примера) представлены исходные значения минимального отклонения от номинального диаметра отверстия после чистовой и черновой обработок (взаимосвязь K_1).

Таблица 1. Минимальное отклонение от номинального диаметра отверстия после чистовой D_{2min} и черновой D_{1min} обработок

| № | Фактор | Параметр | № | Фактор | Параметр | № | Фактор | Параметр |
|---|------------|------------|----|------------|------------|----|------------|------------|
| | D_{1min} | D_{2min} | | D_{1min} | D_{2min} | | D_{1min} | D_{2min} |
| 1 | -2 | 5 | 18 | -3 | 4 | 35 | 0 | 7 |
| 2 | -5 | 6 | 19 | 0 | 10 | 36 | -2 | 6 |
| 3 | -4 | 5 | 20 | -1 | 5 | 37 | -4 | 5 |
| 4 | -4 | 3 | 21 | -3 | 5 | 38 | -2 | 5 |

Продолжение таблицы 1.

| № | Фактор | Параметр | № | Фактор | Параметр | № | Фактор | Параметр |
|----|-------------------|-------------------|----|-------------------|-------------------|----|-------------------|-------------------|
| | D _{1min} | D _{2min} | | D _{1min} | D _{2min} | | D _{1min} | D _{2min} |
| 5 | 0 | 5 | 22 | -2 | 4 | 39 | -5 | 2 |
| 6 | -2 | 7 | 23 | -3 | 2 | 40 | 0 | 8 |
| 7 | -5 | 2 | 24 | -3 | 3 | 41 | -4 | 3 |
| 8 | -1 | 7 | 25 | -4 | 4 | 42 | 0 | 8 |
| 9 | -5 | 1 | 26 | -4 | 2 | 43 | -1 | 5 |
| 10 | 0 | 10 | 27 | -2 | 6 | 44 | 0 | 7 |
| 9 | -5 | 1 | 26 | -4 | 2 | 43 | -1 | 5 |
| 10 | 0 | 10 | 27 | -2 | 6 | 44 | 0 | 7 |
| 11 | -4 | 4 | 28 | -3 | 3 | 45 | -2 | 5 |
| 12 | -3 | 4 | 29 | -3 | 5 | 46 | -1 | 8 |
| 13 | 0 | 10 | 30 | 0 | 7 | 47 | -3 | 5 |
| 14 | 0 | 7 | 31 | -2 | 4 | 48 | -3 | 3 |
| 15 | -3 | 2 | 32 | -2 | 8 | 49 | 0 | 7 |
| 16 | -3 | 4 | 33 | -4 | 2 | 50 | -2 | 5 |
| 17 | -5 | 4 | 34 | -3 | 6 | | | |

Объективно о тесноте связи между двумя переменными можно судить по величине коэффициента корреляции [3]:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}) \cdot (y_i - \bar{Y})}{n \cdot S_x \cdot S_y}, \quad (1)$$

где n – количество пар значений величин x_i и y_i ; \bar{X} , \bar{Y} – средние арифметические значения соответствующих величин x_i и y_i ; S_x , S_y – оценки стандартного отклонения.

После соответствующих расчетов (например, для взаимосвязи K_1) определено, что $\bar{X} = 1,16$, $\bar{Y} = 2,68$ и $S_x = S_y = 3,29$.

По формуле (1) для взаимосвязей K_1 , K_2 , K_3 вычислили: $r(D_{2min}, D_{1min}) = 0,75$; $r(D_{2max}, D_{1max}) = 0,77$; $r(D_{2cp}, D_{1cp}) = 0,778$.

Для определения статистической значимости полученных результатов проверяется гипотеза о равенстве нулю оценки коэффициента корреляции. В качестве критерия при проверке гипотезы используется случайная величина $t_{кр}$, которая подчиняется распределению Стьюдента с $k=n-2$ степенями свободы. Затем $t_{кр}$ сравнивают с величиной, определяемой при анализе результатов ($T_{набл}$).

$$T_{набл} = \frac{r_{x,y} \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{x,y}^2}}, \quad (2)$$

В качестве примера проверим гипотезу о равенстве оценки коэффициента корреляции нулю для взаимосвязи K_1 ($n = 50$). Согласно формуле (2) вычислим наблюдаемое значение случайной величины:

$$T_{набл} = \frac{0,75 \cdot \sqrt{50-2}}{\sqrt{1-0,75^2}} = 7,85$$

По уровню значимости $\alpha=0,05$ и числу степеней свободы $k=50-2=48$ из таблицы [3] находим $t_{кр}(0,05;48) = 1,682$.

Так как $|T_{набл}| > t_{кр}$, то гипотезу отвергаем, то есть оценка коэффициента корреляции статистически значима и между величинами D_{2min} и D_{1min} наблюдается корреляционная зависимость. Такая же зависимость наблюдается и между другими исследуемыми величинами (взаимосвязи K_2, K_3).

Величина коэффициента корреляции $r_{x,y}$ связана с относительной погрешностью оценки коэффициента корреляции γ следующим отношением

$$r_{x,y} = \sqrt{1 - (2\gamma)^2}, \quad (3)$$

Используя формулу (3) и подставляя значение $r_{x,y}$ равное $r(D_{1min}, D_{2min}) = 0,75$, получим $\gamma_1 = 0,33$. То есть относительная погрешность оценки коэффициента корреляции составляет $dr = 33\%$. Аналогично находим относительную погрешность для остальных коэффициентов корреляции.

Значимость корреляции определяется величиной коэффициента корреляции (табл. 2).

Таблица 2. Значимость корреляции

| Значение коэффициента корреляции | Значимость корреляции |
|---|-----------------------|
| $r \leq 0,2$ | очень слабая |
| $r = \text{св. } 0,2 - \text{ до } 0,5$ | слабая |
| $r = \text{св. } 0,5 - \text{ до } 0,7$ | средняя |
| $r = \text{св. } 0,7 - \text{ до } 0,9$ | высокая |
| $r > 0,9$ | очень высокая |

В табл. 3 приведены значения коэффициентов корреляции (r) и относительных погрешностей оценки коэффициента корреляции dr , откуда видно, что в корреляционном анализе взаимосвязей K_1, K_2 и K_3 установлена высокая ($r = 0,7 - 0,9$) корреляция между параметрами (см. табл. 2).

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа

| K_1 | | K_2 | | K_3 | |
|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
| r | $dr, \%$ | r | $dr, \%$ | r | $dr, \%$ |
| 0,750 | 33 | 0,770 | 31,9 | 0,778 | 31,4 |

В результате работы установлено, что точность финишной обработки внутренней цилиндрической поверхности шатуна зависит от точности ее обработки на черновой операции, так как между исследуемыми параметрами наблюдается высокая корреляционная зависимость.

2.2 Корреляционный анализ сопряжения вал-шатун

Определим, какая зависимость существует между выполняемыми размерами цилиндрических поверхностей сопряжения вал-шатун и зазором между этими поверхностями. В табл.4 указаны средние отклонения от номинала диаметра вала (Δd), диаметра отверстия шатуна (ΔD) и зазор между сопрягаемыми поверхностями (j). В табл.4 приведены исходные данные исследуемых параметров. В качестве примера

Таблица 4. Исходные данные

| | | | | | | | |
|----|------------|------------|----|----|------------|------------|----|
| № | Δd | ΔD | j | № | Δd | ΔD | j |
| 1 | -25 | 8 | 33 | 14 | -26 | 6 | 32 |
| 2 | -25 | 13 | 38 | 15 | -22 | 6 | 28 |
| 3 | -26 | 7 | 33 | 16 | -25 | 13 | 38 |
| 4 | -26 | 9 | 35 | 17 | -22 | 6 | 28 |
| 5 | -26 | 2 | 28 | 18 | -25 | 8 | 33 |
| 6 | -23 | 7 | 30 | 19 | -24 | 8 | 32 |
| 7 | -22 | 7 | 29 | 20 | -24 | 13 | 37 |
| 8 | -21 | 14 | 35 | 21 | -23 | 9 | 32 |
| 9 | -25 | 6 | 31 | 22 | -24 | 4 | 28 |
| 10 | -25 | 8 | 33 | 23 | -21 | 6 | 27 |
| 11 | -22 | 8 | 30 | 24 | -25 | 7 | 32 |
| 12 | -26 | 7 | 33 | 25 | -26 | 11 | 37 |
| 13 | -22 | 10 | 32 | | | | |

приведены первые двадцать пять значений анализируемых данных.

Корреляционный анализ проводился для следующих взаимосвязей:

$$K_4=f(j, \Delta d), K_5=f(j, \Delta D).$$

По формуле (1) определим:

$$r_4(j, \Delta d) = 0,43; r_5(j, \Delta D) = 0,814.$$

Проверим гипотезу о равенстве оценки коэффициента корреляции нулю для r_4 и r_5 . Согласно формуле (2) вычислим наблюдаемое значение случайной величины:

$$T_{набл}(r_1) = \frac{0,43 \cdot \sqrt{25-2}}{\sqrt{1-0,43^2}} = 2,286;$$

$$T_{набл}(r_2) = \frac{0,814 \cdot \sqrt{25-2}}{\sqrt{1-0,814^2}} = 6,72;$$

По уровню значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы $k=25-2=23$ находим из

таблицы [3] $t_{кр}(0,05;23) = 2$. Так как $|T_{набл}| > t_{кр}$, то гипотезу отвергаем, то есть оценка коэффициента корреляции статистически значима и между величинами (j, Δd), как и между величинами (j, ΔD) наблюдается линейная зависимость.

Используя формулу (3), подставляя значение $r_{x,y}$ равное $r_4(j, \Delta d) = 0,43$; получим $\gamma = 0,45$. То есть, относительная погрешность значения оценки коэффициента корреляции r_4 составляет $dr_4=45\%$. Подставляя значение $r_{x,y}$ равное $r_5(j, \Delta D) = 0,814$, получим $\gamma = 0,29$. То есть, относительная погрешность значения оценки коэффициента корреляции r_5 составляет $dr_5=29\%$. В табл.5 представлены результаты корреляционного анализа взаимосвязей K_4 и K_5 .

Таблица 5. Результаты корреляционного анализа

| K_4 | | K_5 | |
|-------|-------|-------|-------|
| r | dr, % | r | dr, % |
| 0,430 | 45 | 0,810 | 29 |

При корреляционном анализе взаимосвязи K_4 установлена слабая корреляция между параметрами ($r_4(j, \Delta d) = 0,43$, см. табл. 2). Следовательно, при сборке сопряжения вал-шатун точность финишной обработки поверхности вала (фактор Δd) незначительно влияет на зазор (параметр j) между шатуном и валом. В то же время, при корреляционном анализе взаимосвязи K_5 установлена высокая корреляция между значением зазора сопряжения вал-шатун и диаметром цилиндрической поверхности шатуна ($r_5(j, \Delta D) = 0,814$, см. табл. 2). Следовательно, сборочный зазор сопряжения вал-шатун в основном определяется точностью финишной обработки отверстия шатуна.

Заключение

С использованием метода корреляционного анализа было установлено, что на точность поверхностей сопряжения вал-шатун, выполняемых на чистовой операции, существенно влияет точность обработки этих же поверхностей на черновой операции.

Существует высокая корреляционная зависимость ($r = 0,75$) между выполняемыми размерами, полученными на этих операциях.

Также установлено, что точность обработки внутренней цилиндрической поверхности шатуна значительно влияет на величину зазора между сопрягаемыми поверхностями шатуна и вала при сборке. Величина зазора между поверхностями вала и шатуна в большей степени зависит от точности обработки внутренней цилиндрической поверхности шатуна, чем от точности обработки поверхности вала. Это объясняется тем, что разброс диаметральных значений отверстия шатуна больше, чем разброс диаметральных значений поверхности вала.

Список литературы:

1. В.И. Коваленко, М.В. Меркулов. Оценка стабильности технологического процесса отделочной обработки поверхностей сопряжения вал-шатун // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. Вип. 43. С. 156 - 162. ISSN 2073-3216.
2. Орлов А. И. Прикладная статистика. Учебник. — М.: Экзамен, 2006. — 671 с.
3. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход : монография / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, С.Н. Постовалов, Е.В. Чимитова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.
4. Лекции по эконометрике: учебное пособие /Шанченко Н.И., Ульяновск: УлГТУ, 2008.
5. Коваленко В.И. Корреляционные зависимости между некоторыми величинами при обработке втулок // Сборник научных трудов «Технология и автоматизация машиностроения». Киев: Техника, 1971. Вып.7., С. 39-43.

Надійшла до редакції 05.02.2013.

**В.І. Коваленко, М.В. Меркулов, І.П. Мазур,
М.О. Хміров**

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ПОЄДНАННЯ ВАЛ-ШАТУН КОМПРЕСОРА З ВИКОРИСТАННЯМ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ

У статті наведено методику кореляційного аналізу, представлені результати кореляційного аналізу за трьома параметрами (мінімальне, максимальне і середнє відхилення від номінального розміру діаметра шатуна), а також проаналізовано залежність між зазором і поверхнями, які сполучаються, в парі вал-шатун. Наведена схема сполучених поверхонь, побудована діаграма розсіювання одного з досліджуваних параметрів. У результаті проведеного кореляційного аналізу встановлено, що на точність розмірів, одержуваних на операції фінішної обробки, впливає точність виконання цих розмірів на чорновій операції.

Ключові слова: параметр, фактор, взаємозв'язок, кореляційний аналіз.

**V.I. Kovalenko, M.V. Merkulov, I.P. Mazur,
N.A. Khmirov**

EVALUATION OF THE ACCURACY OF TREATMENT OF COUPLING SURFACE SHAFT-ROD COMPRESSOR USING CORRELATION ANALYSIS

The article describes a method of correlation analysis, the results of the correlation analysis about three parameters (minimum, maximum and average deviation from the nominal size of the diameter rod) and analyzes the relationship between the clearance and the mating surfaces in a pair of rod-shaft. A scheme of the mating surfaces is provided. As a result of correlation analysis we showed that the accuracy of the size obtained by finishing operations affects the accuracy of this size on the roughing operation.

Keywords: option, factor, correlation, correlation analysis.