**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА/PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. ORGANIZATION OF PRODUCTION**

**DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.8**

# КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Научная статья

**Извеков Ю.А.[1, *], Гун И.Г.[2], Шубин И.Г.[3], Полякова М.А.[4], Смирнова Л.В.[5]**

[1] ORCID : 0000-0002-1892-4055;

[2] ORCID : 0000-0002-6201-661X;

[4] ORCID : 0000-0002-1597-8867;

[5] ORCID : 0000-0001-6850-6882;

[1] Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация

[2, 3, 4, 5] Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (maijor076767[at]mail.ru)

**Аннотация**

Исследованы показатели качества конструкций элементов технологического оборудования металлургического предприятия. Статья продолжает исследования авторов по риск-ориентированному подходу к качеству конструкции, эксплуатирующихся в тяжелых и сверхтяжелых режимах. Проведен корреляционный анализ трехмерной модели показателей качества: вероятность безаварийной эксплуатации, тяжело-нагруженные режимы, величина ущерба, риски. Выявлено, что значимым и имеет высокий показатель частный коэффициент корреляции между вероятностью безаварийной работы и величиной ущербов и рисков при условии фиксации тяжело-нагруженных режимов эксплуатации. При соблюдении всех норм эксплуатации и ремонтов технологического оборудования приоритет должен быть отдан мероприятиям и расчетам повышения вероятности безаварийной эксплуатации оборудования и минимизации ущербов и рисков при происшествиях, авариях, катастрофах.

**Ключевые слова:** корреляция, показатели качества, конструкция, коэффициент корреляции, взаимосвязь, вероятность безаварийной эксплуатации, тяжело-нагруженные режимы, величина ущерба, риски, элемент технологического оборудования.

# A CORRELATION ANALYSIS OF STRUCTURAL QUALITY INDICATORS IN THE PROCESS OF OPERATION

Research article

**Izvekov Y.A.[1, *], Gun I.G.[2], Shubin I.G.[3], Polyakova M.A.[4], Smirnova L.V.[5]**

[1] ORCID : 0000-0002-1892-4055;

[2] ORCID : 0000-0002-6201-661X;

[4] ORCID : 0000-0002-1597-8867;

[5] ORCID : 0000-0001-6850-6882;

[1] Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation

[2, 3, 4, 5] G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

* Corresponding author (maijor076767[at]mail.ru)

**Abstract**

The article studies the quality indicators of structural elements of technological equipment elements of metallurgical enterprise. The article continues the authors' research on the risk-oriented approach to the quality of structures operating in heavy and super-heavy modes. The correlation analysis of the three-dimensional model of quality indicators is carried out: probability of failure-free operation, heavy-loaded modes, damage value, risks. It has been found out that the private correlation coefficient between the probability of trouble-free operation and the value of damages and risks is significant and has a high index under the condition of fixing heavy-loaded modes of operation. At observance of all norms of operation and repairs of technological equipment the priority should be given to measures and calculations of increase of probability of accident-free operation of equipment and minimization of damages and risks at incidents, accidents, catastrophes.

**Keywords:** correlation, quality indicators, design, correlation coefficient, interrelation, probability of accident-free operation, heavy-loaded modes, damage value, risks, technological equipment element.

## Введение

Качество конструкции определяется множеством различных показателей. Для его оценки нужно не просто выделить эти показатели, но и проанализировать, и изучить их взаимосвязь [1], [2]. На основе [3], [4], [5], [6] были выделены пятнадцать показателей исследуемых конструкций элементов технологического оборудования, смоделированных и известных в процессе эксплуатации металлургического предприятия на протяжении пятнадцати лет и представлены в таблице 1. Исследованию подвергались конструкции металлургических кранов.

Таблица 1 - Показатели качества конструкции в процессе эксплуатации

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.8.1

| Надежность | | Безопасность | |
|---|---|---|---|
| 1 | Количество конструкций, шт. | 8 | Аварийные события, шт. |
| 2 | Число циклов при эксплуатации, циклы | 9 | Тяжело-нагруженные режимы, % |
| 3 | Наработка без перерывов, % | 10 | Нарушения правил эксплуатации, % |
| 4 | Ремонтопригодность, % | 11 | Нарушение стандартов качества по эксплуатации, % |
| 5 | Вероятность безаварийной эксплуатации, % | 12 | Нарушение технического обслуживания (ТО), % |
| 6 | Выполнение Промежуточных экспертных обследований (ПЭО) и Генеральных экспертных обследований (ГЭО), % | 13 | Социальные и индустриальные риски, кол-во |
| 7 | Величина ущерба, рисковые затраты, % | 14 | Экологические риски, количество |
| - | - | 15 | Техногенные риски, количество |

В предыдущих исследованиях [3], [4], [5], [7], [8] было показано, что на качество конструкции большое влияние оказывают показатели качества: вероятность безаварийной работы и тяжело-нагруженные режимы эксплуатации. Кроме этого было подчеркнуто, что внимания заслуживает еще один показатель величина ущерба, риска конструкции.

Поэтому корреляционный анализ показателей качества конструкции вероятности безаварийной работы, тяжело-нагруженных режимов эксплуатации и величины ущерба, рисков аварий и катастроф представляется актуальной задачей и обладает научной новизной в области риск-ориентированного подхода в области качества в системах и процессах машиностроения [1], [2], [5], [6], [11].

**Методы и принципы исследования**

Используем корреляционный анализ для трехмерной модели [9], [10]. Будем предполагать, что трехмерная непрерывная случайная величина (x,y,z) нормально распределена, и мы можем задать плотности одномерных случайных величин x,y,z. Для трехмерной корреляционной модели большую роль имеют частные и множественные коэффициенты корреляции или детерминации [9]. После проведения корреляционного анализа проверим значимость полученных коэффициентов.

**Постановка задачи**

Для изучения основных и наиболее значимых показателей качества конструкции элементов технологического оборудования рассмотрим совокупность трех главных компонент (признаков). Проанализируем взаимосвязи этих признаков на протяжении пятнадцати лет, по данным [4] и таблицы 1 восстанавливаемого технологического оборудования: x – «вероятность безаварийной работы», %, y – «тяжело-нагруженные режимы эксплуатации», %, z – «величина ущерба, риски», %.

Для выполнения задачи проведем корреляционный этих трех компонент.

**Основные результаты**

В предыдущих исследованиях [3], [4] указано, что удельный вклад 1 главной компоненты равен 29,1%, удельный вклад 2 главной компоненты равен 36,4%. Суммарные вклады по 2 главным компонентам равны 65,5%. Соответственно, вклад третьей компоненты, а именно, величины ущерба и возникающих при этом рисков составит 34,5%.

Предположим, что рассматриваемые признаки x, y, z в такой совокупности подчиняются нормальному закону распределения, а указанные данные представляют выборку из этой совокупности. Исходные данные занесем в таблицу 2.

Таблица 2 - Исходные данные

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.8.2

| | r | x | y | z |
|---|---|---|---|---|
| Показатели качества конструкции | 1 | 95 | 100 | 100 |
| | 2 | 90 | 100 | 99 |
| | 3 | 95 | 100 | 99 |
| | 4 | 95 | 100 | 100 |
| | 5 | 95 | 100 | 99 |
| | 6 | 90 | 100 | 100 |
| | 7 | 90 | 90 | 100 |
| | 8 | 95 | 90 | 100 |
| | 9 | 95 | 95 | 90 |
| | 10 | 85 | 95 | 80 |
| | 11 | 85 | 95 | 85 |
| | 12 | 85 | 95 | 80 |
| | 13 | 85 | 90 | 80 |
| | 14 | 80 | 90 | 80 |
| | 15 | 80 | 95 | 85 |

Для получения точечных оценок генеральных средних, дисперсий, средних квадратических отклонений и парных коэффициентов корреляции результаты промежуточных вычислений поместим в расчетную таблицу 3.

Используя последнюю строку расчетной таблицы, получаем

$$\overline{x} = \frac{1}{15}1340 = 89,3 \ ; \ \overline{y} = \frac{1}{15}1435 = 95,7 \ ; \ \overline{z} = \frac{1}{15}1377 = 91,8 \ ;$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{15}120150 = 8010 \ ; \ \overline{y^2} = \frac{1}{15}137525 = 9168,3 \ ; \ \overline{z^2} = \frac{1}{15}127533 = 8503,5 \ .$$

Тогда $s_x^2 = \overline{x^2} - (\overline{x})^2 = 8010 - 89,3^2 = 35,51 \ ; \ s_x = 5,96 \ ;$

$$s_y^2 = 9168,3 - 95,7^2 = 9,81 \ ; \ s_y = 3,13 \ ;$$

$$s_z^2 = 8503,5 - 91,8^2 = 76,26 \ ; \ s_z = 8,73 \ .$$

Таблица 3 - Расчетная таблица

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.8.3

| | x | y | z | $x^2$ | $y^2$ | $z^2$ | xy | xz | yz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 95 | 100 | 100 | 9025 | 10000 | 10000 | 9500 | 9500 | 10000 |
| | 90 | 100 | 99 | 8100 | 10000 | 9801 | 9000 | 8910 | 9900 |
| | 95 | 100 | 99 | 9025 | 10000 | 9801 | 9500 | 9405 | 9900 |
| | 95 | 100 | 100 | 9025 | 10000 | 10000 | 9500 | 9500 | 10000 |
| | 95 | 100 | 99 | 9025 | 10000 | 9801 | 9500 | 9405 | 9900 |
| | 90 | 100 | 100 | 8100 | 10000 | 10000 | 9000 | 9000 | 10000 |
| | 90 | 90 | 100 | 8100 | 8100 | 10000 | 8100 | 9000 | 9000 |
| | 95 | 90 | 100 | 9025 | 8100 | 10000 | 8550 | 9500 | 9000 |
| | 95 | 95 | 90 | 9025 | 9025 | 8100 | 9025 | 8550 | 8550 |
| | 85 | 95 | 80 | 7225 | 9025 | 6400 | 8075 | 6800 | 7600 |
| | 85 | 95 | 85 | 7225 | 9025 | 7225 | 8075 | 7225 | 8075 |
| | 85 | 95 | 80 | 7225 | 9025 | 6400 | 8075 | 6800 | 7600 |
| | 85 | 90 | 80 | 7225 | 8100 | 6400 | 7650 | 6800 | 7200 |
| | 80 | 90 | 80 | 6400 | 8100 | 6400 | 7200 | 6400 | 7200 |
| | 80 | 95 | 85 | 6400 | 9025 | 7225 | 7600 | 6800 | 8075 |
| Сумма | 1340 | 1435 | 1377 | 120150 | 137525 | 127553 | 128350 | 123595 | 132000 |

Для вычисления точечных оценок парных коэффициентов корреляции используем формулу [9]:

$$r_{xy} = \frac{\sum xy - (\sum x)(\sum y)\frac{1}{n}}{\{[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}][\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}]\}^{\frac{1}{2}}}$$

$$r_{xy} = 0,4770 \ ; \ \ r_{xz} = 0,8185 \ ; \ \ r_{yz} = 0,5060 \ .$$

Получим точечные оценки частных коэффициентов корреляции:

$$r_{xy/z} = \frac{r_x y - r_x z r_y z}{\{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)\}^{\frac{1}{2}}}$$

$$r_{xy/z} = 0,1269 \ ; \ \ r_{xz/y} = 0,5334 \ ; \ \ r_{yz/x} = 0,2288 \ .$$

Проверим значимость частных коэффициентов корреляции с уровнем значимости α=0,05. По таблице распределения r-статистики для числа степеней свободы v=n-3=15-3=12, имеем: парные коэффициенты корреляции по модулю больше 0,425 [9], поэтому, гипотеза о равенстве нулю частных коэффициентов корреляции отвергается с вероятностью ошибки 0,05. Наблюдаемые значения r-статистики для частных коэффициентов корреляции $r_{xy/z}$=0,1269,$r_{yz/x}$=0,2288 меньше 0,381. В этом случае нулевая гипотеза не отвергается, считаем, что эти частные коэффициенты корреляции незначимы, а значимым является $r_{xz/y}$=0,5334.

**Обсуждение**

На основании полученных расчетных данных можем сделать следующие выводы.

Доказана тесная взаимосвязь каждого из показателей качества конструкции с другими – парные коэффициенты корреляции значимы и имеют значения от до. Однако частные коэффициенты корреляции при условии фиксации величины ущербов, рисков между вероятностью безаварийной работы и тяжело-нагруженными режимами, а также при условии фиксации вероятности безаварийной работы между тяжело-нагруженными режимами и величиной ущерба и рисками являются незначимыми. Вместе с тем, является значимым и имеет высокий показатель частный коэффициент корреляции между вероятностью безаварийной работы и величиной ущербов и рисков при условии фиксации тяжело-нагруженных режимов эксплуатации. Отвергать влияние тяжело-нагруженных режимов эксплуатации полностью нельзя, но этот вывод означает, что при соблюдении всех норм эксплуатации и ремонтов технологического оборудования приоритет должен быть отдан мероприятиям и расчетам повышения вероятности безаварийной эксплуатации оборудования и минимизации ущербов и рисков при авариях, катастрофах, происшествиях.

**Заключение**

Таким образом, показана важность при проектировании и эксплуатации элементов технологического оборудования металлургических производств таких показателей качества конструкции как вероятность безаварийной эксплуатации, тяжело-нагруженные режимы эксплуатации, величина ущербов, рисковые затраты и их взаимосвязи, расчеты.

При помощи проведенного корреляционного анализа была выявлена значимость показателей вероятности безаварийной эксплуатации и величиной ущербов. При этом проверка гипотезы о нормальном распределении не проводилась, хотя с помощью критериев согласия можно было убедиться в том, что она не отвергается для частных распределений компонент.

Научно-обоснованный математический аппарат корреляционнного анализа для элементов технологического оборудования не только металлургического, но и других машиностроительных производств, может служить для создания новых моделей их многомерного статистического анализа.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Рецензия**

Нестеренко И.С., Омский государственный технический университет, Омск Российская Федерация

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.8.4

**Review**

Nesterenko I.S., Omsk State Technical University, Omsk Russian Federation

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.8.4

**Список литературы / References**

1. Аникеева О.В. Управление качеством в системах и процессах машиностроения / О.В. Аникеева, Н.П. Золотухина., А.Г. Ивахненко [и др.] — Курск: Университетская книга, 2014. — 208 с.

2. Бойцов Б.В. Управление качеством проектирования и эксплуатации с использованием риск-ориентированного информационного моделирования / Б.В. Бойцов, В.Л. Балановский, М.Ю. Куприков [и др.] // Качество и жизнь. — 2022. — № 3 (35). — С. 86-89.

3. Извеков Ю.А. Научно-методическая база оценки качества технических систем металлургического предприятия / Ю.А. Извеков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2021. — Т. 19. — № 2. — С. 98-102. — DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102.

4. Извеков Ю.А. Снижение размерности в задачах оценки качества мостовых кранов металлургического предприятия / Ю.А. Извеков, А.Л. Анисимов, В.В. Шеметова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. — 2019. — № 3-2. — С. 171-176.

5. Полякова М.А. Использование математических моделей в области практической стандартизации / М.А. Полякова, Ю.А. Извеков, Э.П. Дрягун // Качество. Инновации. Образование. — 2023. — № 5(187). — С. 69-77.

6. Воробьев А.В. Методика анализа требований потребителя к качеству грузоподъемных машин / А.В. Воробьев, А.В. Анцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2023. — Вып. 7. — С. 253-257.

7. ГОСТ Р 27.303-2021. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. — 65 с.

8. ГОСТ 33169-2014. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Подтверждение несущей способности. — 50 с.

9. Дубров А.М. Многомерные статистические методы / А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин. — М.: Финансы и статистика, 2000. — 327 с.

10. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц. — Москва: Финансы и статистика, 1983. — 304 с.

11. Антипов Д.В. Совершенствование процесса проектирования, разработки и постановки на производство автокомпонентов с учетом специальных требований потребителей / Д.В. Антипов, Д.А. Горохова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022. — № 6. — С. 155-166.

## Список литературы на английском языке / References in English

1. Anikeeva O.V. Upravlenie kachestvom v sistemah i processah mashinostroenija [Quality Management in Systems and Processes of Mechanical Engineering] / O.V. Anikeeva, N.P. Zolotuhina., A.G. Ivahnenko [et al.] — Kursk: University Book, 2014. — 208 p. [in Russian]

2. Bojcov B.V. Upravlenie kachestvom proektirovanija i jekspluatacii s ispol'zovaniem risk-orientirovannogo informacionnogo modelirovanija [Design and Operation Quality Management using Risk-Oriented Information Modelling] / B.V. Bojcov, V.L. Balanovskij, M.Ju. Kuprikov [et al.] // Kachestvo i zhizn' [Quality and Life]. — 2022. — № 3 (35). — P. 86-89. [in Russian]

3. Izvekov Ju.A. Nauchno-metodicheskaja baza ocenki kachestva tehnicheskih sistem metallurgicheskogo predprijatija [Scientific and Methodological Base of Quality Assessment of Technical Systems of Metallurgical Enterprise] / Ju.A. Izvekov // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov]. — 2021. — Vol. 19. — № 2. — P. 98-102. — DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102. [in Russian]

4. Izvekov Ju.A. Snizhenie razmernosti v zadachah ocenki kachestva mostovyh kranov metallurgicheskogo predprijatija [Dimensionality Reduction in Problems of Quality Assessment of Bridge Cranes of Metallurgical Enterprise] / Ju.A. Izvekov, A.L. Anisimov, V.V. Shemetova [et al.] // Sovremennye naukoemkie tehnologii [Modern Science-Intensive Technologies]. — 2019. — № 3-2. — P. 171-176. [in Russian]

5. Poljakova M.A. Ispol'zovanie matematicheskih modelej v oblasti prakticheskoj standartizacii [Use of Mathematical Models in the Field of Practical Standardization] / M.A. Poljakova, Ju.A. Izvekov, Je.P. Drjagun // Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie [Quality. Innovations. Education]. — 2023. — № 5(187). — P. 69-77. [in Russian]

6. Vorob'ev A.V. Metodika analiza trebovanij potrebitelja k kachestvu gruzopod#emnyh mashin [Methods of Analysing the Consumer's Requirements to the Quality of Lifting Machines] / A.V. Vorob'ev, A.V. Ancev // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. — 2023. — Iss. 7. — P. 253-257. [in Russian]

7. GOST R 27.303-2021. Nadezhnost' v tehnike. Analiz vidov i posledstvij otkazov [Reliability in Technology. Analysis of Types and Consequences of Failures]. — 65 p. [in Russian]

8. GOST 33169-2014. Krany gruzopod#emnye. Metallicheskie konstrukcii. Podtverzhdenie nesushhej sposobnosti [GOST 33169-2014. Lifting Cranes. Metal Structures. Confirmation of Load-bearing Capacity]. — 50 p. [in Russian]

9. Dubrov A.M. Mnogomernye statisticheskie metody [Multivariate Statistical Methods] / A.M. Dubrov, V.S. Mhitarjan, L.I. Troshin. — M.: Finance and Statistics, 2000. — 327 p. [in Russian]

10. Ferster Je. Metody korreljacionnogo i regressionnogo analiza [Methods of Correlation and Regression Analysis] / Je. Ferster, B. Renc. — Moscow: Finance and Statistics, 1983. — 304 p. [in Russian]

11. Antipov D.V. Sovershenstvovanie processa proektirovanija, razrabotki i postanovki na proizvodstvo avtokomponentov s uchetom special'nyh trebovanij potrebitelej [Improvement of the Design Process, Development and Production of Automotive Components with Special Requirements of Consumers] / D.V. Antipov, D.A. Gorohova // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. — 2022. — № 6. — P. 155-166. [in Russian]