УДК 658.562.012.7:681.518.5

В.Н. Клячкин, А.В. Алексеева

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИЙ ГИДРОАГРЕГАТА¹

Клячкин Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, окончил механический факультет Ульяновского политехнического института. Профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Ульяновского государственного технического университета. Имеет научные труды в области надежности и статистических методов. [e-mail: v_kl@mail.ru].

Алексеева Анастасия Валерьевна, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика» УлГТУ, окончила факультет информационных систем и технологий УлГТУ, инженер по стандартизации АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения». Имеет научные труды в области статистических методов в управлении качеством. [e-mail: age-89@mail.ru].

Аннотация

Для диагностики технического состояния гидроагрегата проводится вибромониторинг, поскольку уровень вибраций в значительной мере определяет качество функционирования агрегата. При оценке стабильности вибраций могут быть использованы методы статистического управления процессами. Множество контролируемых показателей включает как независимые, так и коррелированные показатели. При контроле коррелированных показателей используются методы многомерного контроля. Мониторинг среднего уровня процесса ведется на основе алгоритма Хотеллинга. Для анализа многомерного рассеяния используют алгоритм обобщенной дисперсии. В настоящей работе рассмотрены методика и результаты испытаний по анализу эффективности алгоритма обобщенной дисперсии для контроля многомерного рассеяния вибраций. Вначале строится множество выборок, идентичных исследуемому процессу вибраций гидроагрегата, то есть с вектором средних и ковариационной матрицей, соответствующих обучающей выборке, полученной в реальном процессе. По результатам статистических испытаний получены регрессионные зависимости средней длины серий от характеристик нарушения процесса, на основе которых можно оценить качество диагностики вибраций.

Ключевые слова: стабильность вибраций, многомерное рассеяние, обобщенная дисперсия, средняя длина серий.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-1-5-24-29

STUDY OF THE EFFICIENCY OF STATISTICAL CONTROL OF HYDRO-UNIT VIBRATIONS

Vladimir Nikolaevich Kliachkin, Doctor of Sciences in Engineering, Professor; graduated from the Faculty of Mechanics of Ulyanovsk Polytechnic Institute; Professor at the Department of Applied Mathematics and Informatics of Ulyanovsk State Technical University; an author of scientific publications in the field of reliability, statistical methods. e-mail: v_kl@mail.ru.

Anastasiia Valerevna Alekseeva, Postgraduate Student at the Department of Applied Mathematics and Informatics of UISTU; graduated from the Faculty of Information System and Technologies of UISTU; a standardization engineer at the Ulyanovsk Design Bureau of Instrumentation, JSC; an author of scientific publications in the field of statistical methods of quality control. e-mail: age-89@mail.ru.

Abstract

To diagnose the technical condition of the hydraulic unit, vibration monitoring is carried out, as the level of vibration largely determines the quality of operation of the unit. When assessing the stability of vibrations, methods of statistical process control can be used. Many monitored indicators include both independent and correlated indicators. When monitoring correlated indicators, multivariate control methods are used. Mid-level monitoring of the process is based on the Hotelling algorithm. For the analysis of multivariate scattering, the generalized dispersion algorithm is used. The methodology and test results for analyzing the effectiveness of the generalized dispersion algorithm for controlling multidimensional vibration scattering are considered. Regression dependences of the average run length on the characteristics of the process

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства Ульяновской области, проект 18-48-730001.

disturbance were constructed, on the basis of which the quality of vibration diagnostics can be estimated. Initially, a lot of samples are constructed that are identical to the studied process of vibration of the hydraulic unit, that is, with a vector of average and covariance matrix corresponding to the training sample obtained in the real process. Based on the results of statistical tests, regression dependences of the average length of the series on the characteristics of the process violation were obtained, on the basis of which the quality of vibration diagnostics can be estimated.

Key words: vibration stability, multivariate scattering, generalized dispersion, average run length.

Постановка задачи

Для диагностики технического состояния гидроагрегата проводится вибромониторинг, поскольку уровень вибраций в значительной мере определяет качество его функционирования [1, 2]. При проведении исследования использовались данные по контролю десяти показателей уровня вибраций гидроагрегата на Красноярской ГЭС: вибрации нижнего и верхнего генераторного подшипника верхнего бьефа и на правом берегу, бой вала гидротурбины на нижнем бьефе и правом берегу, бой вала гидрогенератора, а также вибрации крышки гидротурбины [3, 4].

Для оценки стабильности вибраций могут быть использованы методы статистического управления процессами. Множество контролируемых показателей включает как независимые, так и коррелированные показатели. При контроле коррелированных показателей используются методы многомерного контроля [5–7]. Мониторинг среднего уровня процесса ведется на основе алгоритма Хотеллинга. Эффективность многомерного статистического контроля с применением алгоритма Хотеллинга подробно изучена [5].

Для анализа многомерного рассеяния используют алгоритм обобщенной дисперсии: через определенные промежутки времени берутся выборки, и для каждой из них вычисляется обобщенная дисперсия, то есть определитель ковариационной матрицы контролируемых показателей; изменение этого параметра и характеризует стабильность рассеяния процесса [8, 9].

Строится соответствующая контрольная карта: откладываются опытные точки и контрольная граница (на рисунке 1 эта карта построена по пяти контролируемым показателям вибраций в системе Statistica [10], по горизонтальной оси отложены номера выборок); выход точки за контрольную границу (критическое значение обобщенной дисперсии равно 73379) свидетельствует о нарушении стабильности процесса. Из рисунка 1 видно,

Рис. 1. Контрольная карта обобщенной дисперсии для коррелированных показателей вибраций

что процесс не нарушен: выходов за контрольную границу нет.

Цель исследования – оценить эффективность контроля многомерного рассеяния процесса с применением алгоритма обобщенной дисперсии: насколько быстро карта обобщенной дисперсии реагирует на возможные нарушения процесса.

Моделирование данных

Для оценки эффективности контроля необходимо проведение специальных испытаний [10, 11]. С этой целью было смоделировано множество наборов данных, идентичных исследуемому процессу вибраций гидроагрегата, то есть с вектором средних и ковариационной матрицей, соответствующих обучающей выборке, полученной в реальном процессе: объективная оценка средней длины серий возможна лишь по множеству выборок.

Среди десяти контролируемых значений вибраций исследуемого гидроагрегата три показателя оказались независимыми от других, остальные семь разделились на два множества – по два и пять коррелированных показателей.

На рисунке 2 показаны вектор средних μ_0 и ковариационная матрица Σ_0 для группы из пяти коррелированных показателей вибраций, по которым были смоделированы 1000 аналогичных выборок.

Чувствительность контроля к возможным нарушениям характеризуется специальной величиной – средней длиной серий – это количество наблюдений от момента нарушения процесса до момента обнаружения этого нарушения.

Для оценивания средней длины серий при различных вариантах контроля необходимо смоделировать возможные нарушения процесса. Наиболее распространенным нарушением является скачкообразное увеличение рассеяния вибраций, при этом определитель ковариационной матрицы процесса Σ увеличивается в d раз по сравнению с исходной:

$$\Sigma = d \cdot \Sigma_0. \quad (1)$$

На рисунке 3 показано увеличение рассеяния процесса при $d = 1,5$, начиная с выборки 15: по горизонтальной оси отложен номер выборки, по вертикальной – рассеяние процесса. Размах обобщенной дисперсии (по двум показателям вибрации) до 15-й выборки лежит в диапазоне примерно от 6 до 9, после 15-й выборки – от 4 до 11.

Рис. 2. Числовые характеристики группы показателей вибраций

Рис. 3. Скачкообразное увеличение рассеяния процесса

Другой распространенный вариант нарушения стабильности процесса – постепенное увеличение рассеяния (тренд). В этом случае

$$\Sigma = [1 + d_0(t - t_0)] \cdot \Sigma_0, \quad (2)$$

где t – текущий номер выборки, t_0 – номер выборки, с которой начался тренд, d_0 – характеристика интенсивности тренда.

На рисунке 4 показан соответствующий график, иллюстрирующий постепенное изменение рассеяния

Рис. 4. Постепенное увеличение (тренд) рассеяния процесса

процесса вибраций, начиная с выборки $t_0 = 15$ при $d_0 = 0,02$. Если до 15-й выборки размах, как и ранее, в пределах от 6 до 9, то далее он плавно растет до диапазона 4–13.

Специально разработанная программа [12] обеспечивала моделирование множества наборов данных, на которых проводились испытания, воспроизводя предполагаемые нарушения процесса (рис. 5): жирная линия показывает значения обобщенной дисперсии до нарушения, тонкая – после наложения тренда.

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Испытания повторялись многократно. Для каждого из множеств коррелированных показателей вибраций моделировались по 1000 идентичных наборов. На каждом наборе в автоматическом режиме моделировались по два вида нарушений (скачкообразное и постепенное увеличение рассеяния) с различными числовыми характеристиками. Для скачкообразного увеличения в формуле (1) принимались значения $d = 1,25; 1,5; 1,75$ и 2. При постепенном увеличении рассеяния в формуле (2) принимались значения характеристики интенсивности тренда $d_0 = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04$ и 0,05.

Для смоделированных данных строились карты обобщенной дисперсии, по которым и находилась длина серий для конкретного нарушения в данной выборке. Усредняя результат по множеству из 1000 наборов, получали среднюю длину серий.

Результаты испытаний представлены на рисунках 6, 7. По вертикальной оси на обоих рисунках отложены значения средней длины серий, по горизонтальной – на рисунке 6 значения d , на рисунке 7 – d_0 .

Рис. 5. Моделирование нарушения процесса в виде тренда

На рисунке 6 показаны опытные точки и их аппроксимация для зависимости средней длины серий от характеристики d скачкообразного увеличения рассеяния. При контроле двух показателей ($p = 2$) параболическая регрессионная зависимость (построена с использованием инструмента Линия тренда в электронных таблицах Excel) имеет вид:

$$L(d) = -6,88d^2 + 18,84d - 0,38, \quad (3)$$

при этом коэффициент детерминации, характеризующий качество построенной зависимости, $R^2 = 0,996$, что свидетельствует о высокой прогностической способности модели (3).

Рис. 6. Средняя длина серий карты обобщенной дисперсии для скачкообразного увеличения рассеяния

При контроле пяти показателей ($p = 5$) соответствующая зависимость имеет вид:

$$L(d) = -5,36d^2 + 13,50d - 3,028, \quad (4)$$

коэффициент детерминации $R^2 = 0,993$.

На рисунке 7 показаны опытные точки и их аппроксимация линиями тренда (в этом случае достаточно высокую точность обеспечивает линейная связь) для зависимости средней длины серий от характеристики d_0 постепенного увеличения рассеяния. При контроле двух показателей ($p = 2$) регрессионная зависимость имеет вид:

$$L(d_0) = 95,6d_0 + 36,54, \quad (5)$$

при этом коэффициент детерминации $R^2 = 0,982$.

Рис. 7. Средняя длина серий карты обобщенной дисперсии для постепенного увеличения рассеяния

При контроле пяти показателей ($p = 5$)

$$L(d_0) = 35,58d_0 + 16,21, \quad (6)$$

коэффициент детерминации $R^2 = 0,989$.

Видно, что средняя длина серий в этом случае гораздо больше, чем на рисунке 6. Это иллюстрирует очевидный факт, что скачкообразное увеличение рассеяния процесса обнаруживается существенно быстрее, чем постепенное.

Методы повышения эффективности контроля

Предположим, что при контроле двух показателей вибраций опасным является скачкообразное увеличение рассеяния в 1,3 раза. Тогда из формулы (3) следует, что карта обобщенной дисперсии обнаружит такое нарушение через $L(1,3) = 12,8$ выборки. Иногда такое значение недопустимо: за это время вибрации гидроагрегата могут вызвать нежелательные последствия.

Повышение чувствительности карты к нарушениям процесса можно обеспечить, если для обнаружения скачкообразного увеличения рассеяния использовать карту на основе алгоритма экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии (на рисунке 8 такая карта построена в системе Statistica) или карту с предупреждающей границей [13, 14].

Рис. 8. Контрольная карта экспоненциально взвешенных скользящих средних: нарушение процесса в выборке 3

Для повышения чувствительности контроля к обнаружению постепенного увеличения рассеяния может быть использована обычная карта обобщенной дисперсии, но с анализом неслучайных структур. Одной из таких структур является тренд: наличие на карте шести точек подряд на убывание или возрастание; можно доказать, что такое расположение точек маловероятно, оно соизмеримо с вероятностью ложной тревоги на карте и свидетельствует о нарушении стабильности процесса. Следует отметить только, что такой подход не учитывает количественных характеристик тренда. Кроме того, возможны и более сложные проявления тренда, нежели последовательность точек на убывание или возрастание.

Заключение

В статье предложена методика проведения статистических испытаний и обработки их результатов для анализа эффективности многомерного контроля процесса с

помощью контрольной карты, основанной на алгоритме обобщенной дисперсии. Опираясь на результаты проведенного исследования, можно оценить чувствительность алгоритма обобщенной дисперсии к возможным нарушениям стабильности вибраций гидроагрегата и, при необходимости, заменить при мониторинге вибраций обычную карту обобщенной дисперсии на специальную, использующую или экспоненциальное сглаживание данных, или предупреждающую границу, или анализ неслучайных структур на карте. Для количественной оценки эффективности этих трех подходов при мониторинге многомерного рассеяния необходимо проведение специальных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стандарт организации НП «Инновации в электроэнергетике». СТО 70238424.27.140.001-2011. Гидроэлектростанции. Методика оценки технического состояния основного оборудования. М. : 2011. 400 с.
2. Владиславлев Л.А. Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций. М. : Энергия, 1972. 153 с.
3. Иванова (Алексеева) А.В. Исследование стабильности вибраций гидроагрегата с применением методов статистического контроля // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования : сб. тр. IX Всерос. школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых. Ульяновск : УлГТУ, 2017. С. 117–120.
4. Клячкин В.Н., Алексеева А.В. Оценка стабильности функционирования гидроагрегата по результатам мониторинга вибраций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 3. С. 11–18.
5. Montgomery D.C. Introduction to statistical quality control. New York: John Wiley and Sons, 2009. 754 p.
6. Tan Y.C., Lee M.H., Winnie W.W. An improved switching rule in variable sampling interval Hotelling's control chart // Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2015. pp. 1412–1416.
7. Lee M.H. Variable sampling rate Hotelling's control chart with runs rules // South African Journal of Industrial Engineering. 2012. V. 23 (1). pp. 122–129.
8. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview // Quality and reliability Engineering International. 2007. V. 23. pp. 517–543.
9. García-Díaz, J. Carlos. The 'effective variance' control chart for monitoring the dispersion process with missing data // Industrial Engineering. 2007. Vol. 1, № 1. pp. 40–45.
10. Боровиков В. STATISTICA: искусство анализа данных. Для профессионалов. СПб. : Питер, 2001. 656 с.
11. Клячкин В.Н., Святова Т.И., Кравцов Ю.А. Моделирование данных технологического процесса для анализа эффективности многомерного статистического контроля // Автоматизация процессов управления. 2015. № 1 (39). С. 57–62.
12. Алексеева А.В. Программа моделирования выборок для оценки эффективности контроля вибраций гидроагрегата // Информатика, моделирование, авто-

матризация проектирования : сб. тр. X Всерос. школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых. Ульяновск : УлГТУ, 2018. С. 46–48.

13. Ryan T.P. Statistical methods for quality improvement. New York: John Wiley and Sons, 2011. 687 p.

14. Уиллер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами : Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта ; пер. с англ. М. : Альпина Бизнес Букс, 2009. 409 с.

REFERENCES

1. *Standart organizatsii NP "Innovatsii v elektroenergetike". STO 70238424.27.140.001-2011. Gidroelektrostantsii. Metodika otsenki tekhnicheskogo sostoiianiia osnovnogo oborudovaniia* [The Standard of the 'Innovations in Power Industry' Nonprofit Enterprise. Hydroelectric Power Plants. The Methods of Technical State Estimation of Main Power Equipment]. Moscow, 2011. 400 p.

2. Vladislavlev L.A. *Vibratsiia gidroagregatov gidroelektricheskikh stantsii* [Vibration of Hydroturbine Units]. Moscow, Energiia Publ., 1972. 153 p.

3. Ivanova (Alekseeva) A.V. Issledovanie stabilnosti vibratsii gidroagregata s primeneniem metodov statisticheskogo kontroliia [The Study of Hydraulic Unit Vibration Stability with the Use of Statistical Control Methods]. *Informatika, modelirovanie, avtomatizatsiia proektirovaniia. Sb. tr. IX Vseros. shkoly-seminara aspirantov, studentov i molodykh uchenykh* [Proc. of the 9th Russian Workshop of Postgraduates, Students and Young Scientists. Informatics, Modeling, Computer-Aided Design]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2017, pp. 117–120.

4. Kliachkin V.N., Alekseeva A.V. Otsenka stabilnosti funktsionirovaniia gidroagregata po rezul'tatam monitoringa vibratsii [Estimation of Stability of Functioning of the Hydraulic Unit According to the Results of Vibration]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2019, no. 3, pp. 11–18.

5. Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*. New York: John Wiley and Sons, 2009. 754 p.

6. Tan Y.C., Lee M.H., Winnie W.W. An Improved Switching Rule in Variable Sampling Interval Hotelling's Control Chart. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2015, pp. 1412–1416.

7. Lee M.H. Variable Sampling Rate Hotelling's Control Chart with Runs Rules. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2012, vol. 23 (1), pp. 122–129.

8. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview. *Quality and Reliability Engineering International*, 2007, vol. 23, pp. 517–543.

9. García-Díaz, J. Carlos. The 'Effective Variance' Control Chart for Monitoring the Dispersion Process with Missing Data. *Industrial Engineering*, 2007, vol. 1, no. 1, pp. 40–45.

10. Borovikov V. *STATISTICA: iskusstvo analiza dannykh. Dlia professionalov* [Statistics: Art of Data Analysis. For Professionals]. St. Petersburg, Piter Publ., 2001. 656 p.

11. Kliachkin V.N., Sviatova T.I., Kravtsov Iu.A. Modelirovanie dannykh tekhnologicheskogo protsessa dlia analiza effektivnosti mnogomernogo statisticheskogo kontroliia [Workflow Data Modeling for Analysis of Multidimensional Statistical Control Effectiveness]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2015, no. 1 (39), pp. 57–62.

12. Alekseeva A.V. Programma modelirovaniia vyborok dlia otsenki effektivnosti kontroliia vibratsii gidroagregata [Sampling Modeling Program for the Estimate of Hydraulic Unit Vibration Monitoring Efficiency]. *Informatika, modelirovanie, avtomatizatsiia proektirovaniia. Sb. tr. X Vseros. shkoly-seminara aspirantov, studentov i molodykh uchenykh* [Proc. of the 10th Russian Workshop of Postgraduates, Students and Young Scientists. Informatics, Modeling, Computer-Aided Design]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2018, pp. 46–48.

13. Ryan T.P. *Statistical Methods for Quality Improvement*. New York, John Wiley and Sons, 2011. 687 p.

14. Wheeler D., Chambers D. Statisticheskoe upravlenie protsessami: Optimizatsiia biznesa s ispolzovaniem kontrolnykh kart Shukharta. Per. s angl. [Understanding Statistical Process Control. Translated from Engl.]. Moscow, Alpina Biznes Buks Publ., 2009. 409 p.