УДК 658.562.012.7:681.518.5

А.В. Алексеева

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МНОГОМЕРНОГО РАССЕЙЯНИЯ ПРОЦЕССА¹

Алексеева Анастасия Валерьевна, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика» Ульяновского государственного технического университета, 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

При диагностике технического состояния объекта могут использоваться методы статистического управления процессами, при этом контроль многомерного рассеяния проводится с применением алгоритма обобщенной дисперсии. Через определенные промежутки времени фиксируются выборки наблюдений, по которым вычисляются значения определителя ковариационной матрицы – обобщенной дисперсии. Выход соответствующей точки на контрольной карте за границу означает нарушение процесса. Результаты испытаний на примере вибраций гидроагрегата на Краснополянской ГЭС показали недостаточную чувствительность алгоритма обобщенной дисперсии как к постепенному, так и к скачкообразному изменению уровня рассеяния. С целью повышения эффективности контроля было предложено использование трех подходов: выявление нарушений путем анализа структур специального вида на карте обобщенной дисперсии; использование предупреждающих границ на карте; применение алгоритма экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии. Проведенные испытания показали, что наиболее эффективен для скорейшего обнаружения изменения рассеяния процесса поиск неслучайных структур на карте обобщенной дисперсии.

Ключевые слова: обобщенная дисперсия, средняя длина серий, вибрации гидроагрегата, предупреждающая граница, экспоненциально взвешенные скользящие средние.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-3-61-101-107

IMPROVING THE EFFICIENCY OF STATISTICAL CONTROL OF HYDRO-UNIT VIBRATIONS

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

Abstract

Some techniques of statistical process control can be applied in investigating an object for likely defects. In this regard, the multidimensional scattering is monitored with the use of a generalized variance algorithm. At fixed time intervals samples of observations are recorded, according to which the values of the determinant of covariance matrix (the generalized variance) are calculated. The corresponding point, falling outside the borders of control chart, indicates the process failure. The test results based on vibration data obtained from the hydraulic unit at the Krasnopolianskaia Hydroelectric Power Station showed that the algorithm of the generalized variance has an insufficient quick response relating to both gradual and spasmodic changes in the scattering level. To make the monitoring process more efficient, the following techniques have been suggested. The first one detects defects by analyzing special kind structures on the generalized variance chart. The second technique applies the warning borders on the chart and the third one implies an algorithm of exponentially weighted moving averages for generalized variance. All the tests revealed that the search for nonrandom structures on the generalized variance chart is most effective for the early detection of changes in the scattering process.

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

Key words: generalized variance, average run length, hydraulic unit vibrations, warning borders, exponentially weighted moving averages.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При диагностике технического состояния гидроагрегата по результатам вибромониторинга могут использоваться методы статистического управления процессами, при этом контроль многомерного рассеяния проводится с применением алгоритма обобщенной дисперсии [1–3]. Через определенные промежутки времени фиксируются выборки наблюдений, по которым вычисляются значения определителя ковариационной матрицы в выборке с номером t – обобщенной дисперсии Σ_t . Эти значения сравниваются с границами доверительного интервала. Выход соответствующей точки на контрольной карте за границу означает нарушение процесса: рассеяние вибраций существенно изменяется, что может привести к ухудшению качества функционирования гидроагрегата [4, 5].

Для оценки эффективности такого контроля определяется его чувствительность к возможным нарушениям: как быстро контрольная карта среагирует на изменение рассеяния? Соответствующая характеристика – средняя длина серий (количество наблюдений от момента нарушения процесса до его обнаружения) – иногда может быть найдена аналитически [6, 7], но чаще оценивается по результатам статистических испытаний. Результаты таких испытаний на примере вибраций гидроагрегата на Краснополянской ГЭС, приведенные в статье [3], показали недостаточную чувствительность алгоритма обобщенной дисперсии как к постепенному, так и к скачкообразному изменению уровня рассеяния.

Следует отметить, что указанная проблема характерна не только при анализе вибросостояния гидроагрегата, но и в ряде других задач технической диагностики: при оценке качества питьевой воды по результатам диагностики системы водоочистки, при мониторинге очистки сточных вод при производстве печатных плат и т. п. [8].

С целью повышения эффективности контроля было предложено использование трех подходов, идентичных тем, что применяются при многомерном контроле среднего уровня процесса на основе алгоритма Хотеллинга [9]:

- выявление нарушений путем анализа структур специального вида на карте обобщенной дисперсии;
- использование предупреждающих границ на карте;
- применение алгоритма экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии.

Цель настоящей работы – оценка эффективности контроля многомерного рассеяния процесса с применением предложенных модификаций алгоритма обобщенной дисперсии и разработка соответствующих рекомендаций: какой из подходов наиболее эффективен при заданном (предполагаемом) виде нарушения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Для оценки чувствительности метода контроля процесса к возможным нарушениям, как и при испытаниях алгоритма обобщенной дисперсии [3, 10], моделировались 1000 выборок данных, идентичных процессу вибраций гидроагрегата: с вектором средних и ковариационной матрицей, соответствующих выборке из реального процесса.

Кроме того, моделировались два наиболее распространенных вида нарушения процесса: скачкообразное увеличение рассеяния, когда определитель ковариационной матрицы процесса Σ увеличивается в d раз по сравнению с определителем исходной матрицы Σ_0 :

$$\Sigma = d \Sigma_0, \quad (1)$$

а также постепенное увеличение рассеяния:

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

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

В качестве первого метода повышения чувствительности многомерного контроля рассеяния рассматривалось выявление структур специального вида на карте обобщенной дисперсии: это особые конфигурации точек на контрольной карте, появление которых случайным образом маловероятно (соизмеримо с вероятностью ложной тревоги). Различные типы таких структур для карт Шухарта подробно рассмотрены в известной книге японского специалиста Х. Куме [11].

Учитывая, что карта обобщенной дисперсии базируется на нормальном распределении с применением правила «трех сигм» (т. е. расстояние от центральной линии до нижней и верхней контрольных границ составляет по три стандартных отклонения), рассмотрены следующие структуры:

- выход хотя бы одной точки за контрольную границу;
- выход хотя бы двух из трех последовательных точек за двухсигмовые пределы;
- выход хотя бы четырех из пяти последовательных точек за односигмовые пределы;
- девять точек подряд вблизи от центральной линии в односигмовых пределах;
- шесть убывающих или возрастающих точек подряд (тренд);
- семь точек подряд по одну сторону от центральной линии.

В программе проведения испытаний алгоритма обобщенной дисперсии был разработан специальный модуль для поиска перечисленных структур. Интерфейс

Рис. 1. Интерфейс модуля поиска структур специального вида на карте обобщенной дисперсии

модуля показан на рисунке 1, а результат поиска – на рисунке 2: на карте обнаружен тренд (шесть точек подряд по возрастанию) от выборки 23 до выборки 28 (по горизонтальной оси отложен номер выборки, по вертикальной – рассеяние процесса).

Расчет средней длины серий проводился так. Задавалось значение d или d_0 (в зависимости от того, ска-

лообразное или постепенное изменение рассеяния исследовалось), а также точка t_0 , начиная с которой моделировалось смещение. Программа обнаружила нарушение в выборке с номером t (на рисунке 2 $t = 10$). Тогда длина серий в этом испытании равна $t - t_0$, а средняя длина серий определяется усреднением по 1000 выборок.

Рис. 2. Обнаружение тренда на карте обобщенной дисперсии

В качестве второго метода повышения чувствительности алгоритма обобщенной дисперсии предложено применение предупреждающей границы. В этом случае о нарушении процесса свидетельствует не только выход точки за контрольную границу, но и попадание двух, трех или четырех точек подряд между предупреждающей и контрольной границами. Этот метод эффективно применяется при однопараметрическом контроле для карт арифметического среднего [12], а также для многомерных карт Хотеллинга [9, 13, 14]. Для расчета

положения предупреждающих границ (верхней UWL и нижней LWL) используется аппарат теории марковских цепей. Результат расчета может быть представлен в виде [6, 12]:

$$\left. \begin{matrix} UWL \\ LWL \end{matrix} \right\} = \Sigma_0 (b_1 \pm B\sqrt{b_2}), \quad (3)$$

где Σ_0 – определитель ковариационной матрицы, коэффициенты b_1 и b_2 определяются по формулам:

$$b_1 = \frac{1}{(n-1)^p} \prod_{j=1}^p (n-j), \quad (4)$$

$$b_2 = \frac{1}{(n-1)^{2p}} \prod_{j=1}^p (n-j) \left[\prod_{k=1}^p (n-k+2) - \prod_{k=1}^p (n-k) \right], \quad (5)$$

где p – количество контролируемых показателей, $i, j = 1, \dots, p$; n – объем выборки; коэффициент B определяется по таблицам [12] в зависимости от количества точек между предупреждающей и контрольной границами. На практике целесообразно проверить все три варианта: 2, 3 или 4 точки между границами.

На рисунке 3 показан пример построения такой карты, когда попадание трех точек подряд между границами свидетельствует о нарушении процесса: нарушение процесса обнаружено в выборке 29 (по оси абсцисс

отложен номер выборки, по оси ординат – рассеяние процесса).

Наконец, третий подход к модификации алгоритма обобщенной дисперсии – использование контрольных карт экспоненциально взвешенных скользящих средних (ЭВСС). Значения ЭВСС, откладываемые на карте, рассчитываются по формуле:

$$E_t = (1 - \lambda) E_{t-1} + \lambda \sum_t, \quad (6)$$

где λ – параметр экспоненциального сглаживания ($0 < \lambda < 1$).

Рис. 3. Карта обобщенной дисперсии с предупреждающей границей: три точки подряд между границами свидетельствуют о нарушении процесса

Рис. 4. Контрольная карта экспоненциально взвешенной скользящей средней для обобщенной дисперсии

Положения контрольных границ карты ЭВСС для обобщенной дисперсии рассчитываются по формуле:

$$\left. \begin{matrix} UCC \\ LCC \end{matrix} \right\} = \Sigma_0 \pm H\sigma_{E_t}, \quad (7)$$

где H – параметр, определяющий положение границ (обычно принимают $H = 3$); стандартное отклонение ЭВСС можно найти из формулы:

$$\sigma_{E_t}^2 = \frac{\sigma_{\Sigma}^2}{n} \frac{\lambda}{2-\lambda} [1 - (1-\lambda)^{2t}], \quad (8)$$

где σ_{Σ} – оценка стандартного отклонения обобщенной дисперсии.

Построение карты ЭВСС для обобщенной дисперсии и расчет ее средней длины серий осуществляется в соответствующем модуле программы. Пример такой карты показан на рисунке 4: имеет место выброс за верхнюю контрольную границу в выборке 27 (по горизонтальной оси отложен номер выборки, по вертикальной – рассеяние процесса).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ВЫВОДЫ

На рисунке 5 представлены графики зависимости средней длины серий (СДС) от характеристики нарушения процесса d при скачкообразном увеличении рассеяния при всех трех рассмотренных подходах. На рисунке 6 соответствующие графики показаны в зависимости от значения d_0 при постепенном увеличении рассеяния. По оси абсцисс на обоих рисунках отложены значения СДС, по оси ординат – на рисунке 5 значения d , на рисунке 6 – d_0 .

Как видно из полученных результатов, наиболее эффективным методом повышения эффективности карты обобщенной дисперсии является поиск неслучайных структур: соответствующий график располагается ниже остальных, следовательно, средняя дли-

Рис. 5. Графики СДС при скачкообразном увеличении рассеяния

Рис. 6. Графики СДС при постепенном увеличении рассеяния (тренде)

на серий принимает наименьшее значение, и количество наблюдений от момента нарушения процесса до момента обнаружения этого нарушения будет меньше, чем при остальных методах контроля.

Применение карты экспоненциально взвешенной скользящей средней для обобщенной дисперсии и предупреждающей границы при небольших коэффициентах увеличения рассеяния (менее чем в 1,5 раза – при скачкообразном увеличении и на 0,02 – при тренде) практически не влияет на чувствительность карты обобщенной дисперсии. Однако эффективность данных методов повышается при более высоких коэффициентах увеличения рассеяния (при d , равном 1,75 и более при скачкообразном увеличении, и при значениях d_0 более 0,03 – в случае тренда).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова (Алексеева) А.В., Клячкин В.Н. Использование алгоритмов многомерного контроля при вибромониторинге гидроагрегата // Перспективные информационные технологии. Самарский научный центр РАН, 2018. С. 1007–1010.
2. Алексеева А.В. Применение методов статистического контроля для диагностики вибросостояния гидроагрегата // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2019. № 1 (85). С. 67–71.
3. Клячкин В.Н., Алексеева А.В. Исследование эффективности статистического контроля вибраций гидроагрегата // Автоматизация процессов управления. 2020. № 1 (59). С. 24–29.
4. Стандарт организации НП «Инновации в электроэнергетике». СТО 70238424.27.140.001-2011. Гидроэлектростанции. Методика оценки технического состояния основного оборудования. М. : 2011. 400 с.
5. 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.

6. Клячкин В.Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. 196 с.

7. Montgomery D.C. Introduction to statistical quality control. New York: John Wiley and Sons, 2009. 754 p.

8. Клячкин В.Н., Подольская З.В., Ширкунова К.С. Мониторинг процесса очистки сточных вод при производстве печатных плат с учетом коррелированности показателей // Экологические системы и приборы. 2019. № 5. С. 3–10

9. Клячкин В.Н. Повышение эффективности алгоритма Хотеллинга при оценке стабильности функционирования объекта / В.Н. Клячкин, И.Н. Карпунина, Ю.А. Кравцов, Д.С. Бубыр // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4 (28). С. 127–135.

10. Алексеева А.В. Программа моделирования выборок для оценки эффективности контроля вибраций гидроагрегата // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования. X Всероссийская школа-семинар аспирантов, студентов и молодых ученых. Ульяновск, 2018. С. 46–48.

11. Статистические методы повышения качества / под ред. Х. Куме ; пер. с англ. и доп. Ю.П. Адлера, Л.А. Коняревой. М. : Финансы и статистика, 1990. 304 с.

12. ГОСТ Р 50779.41-96. Статистические методы. Контрольные карты для арифметического среднего с предупреждающими границами. М. : ИПК Издательство стандартов, 1996. 28 с.

13. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview // Quality and reliability Engineering International. 2007. V. 23. pp. 517–543.

14. Клячкин В.Н., Крашенинников В.Р., Кувайскова Ю.Е. Прогнозирование и диагностика стабильности функционирования технических объектов. М. : Русайнс, 2020. 200 с.

REFERENCES

1. Ivanova (Alekseeva) A.V., Klyachkin V.N. Ispolzovanie algoritmov mnogomernogo kontrolya pri vibromonitoringe gidroagregata [The Multivariate Monitoring Algorithms Using for Hydro-Unit Vibrations Monitoring]. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii* [Advanced Information Technologies]. Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2018, pp. 1007-1010.
2. Alekseeva A.V. Primenenie metodov statisticheskogo kontrolya dlia diagnostiki vibrosostoiianiia gidroagregata [The Statistical Control Methods Applied for Diagnostics of Vibrostate of Hydro-Unit]. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Herald

of Ulyanovsk State Technical University], 2019, no. (85), pp. 67–71.

3. Kliachkin V.N., Alekseeva A.V. Issledovanie effektivnosti statisticheskogo kontrolya vibratsii gidroagregata [Study of the Efficiency of Statistical Control of Hydro-Unit Vibrations]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2020, no. 1 (59), pp. 24–29.

4. Standart organizatsii NP "Innovatsii v elektroenergetike". STO 70238424.27.140.001-2011. *Gidroelektrostantsii. Metodika otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo oborudovaniya* [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.

5. Kliachkin V.N., Alekseeva A.V. Otsenka stabilnosti funktsionirovaniya gidroagregata po rezul'tatam monitoringa vibratsii [Estimation of Stable Operation of Hydro-Unit Based on Vibration Monitoring Results]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2019, no. 3, pp. 11–18.

6. Kliachkin V.N. *Modeli i metody statisticheskogo kontrolya mnogoparametricheskogo tekhnologicheskogo protsessa* [Models and Methods for Statistical Control of Polyvalent Technological Process]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 196 p.

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

8. Kliachkin V.N., Podolskaya Z.V., Shirkunova K.S. Monitoring protsessa oshchistki stochnykh vod pri proizvodstve pechatnykh plat s uchetom korrelirovannosti pokazatelei [Monitoring of Sewage Purification in the PCBs Production Process Considering Correlated Characteristics]. *Ekologicheskie sistemy i pribory*

[Ecological Systems and Instruments], 2019, no. 5, pp. 3–10.

9. Kliachkin V.N. Povyshenie effektivnosti algoritma Khotellinga pri otsenke stabilnosti funktsionirovaniya obekta [Improving the Efficiency of the Hotelling's Algorithm when Evaluating the Stability of an Object]. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem* [Quality and Reliability of Complex Systems], 2019, no. 4 (28), pp. 127–135.

10. Alekseeva A.V. Programma modelirovaniya vyborok dlya otsenki effektivnosti kontrolya vibratsii gidroagregata [The Sampling Simulation Program to Evaluate the Efficiency of Hydro-Unit Vibrations Control]. *Informatika, modelirovaniye, avtomatizatsiya proektirovaniya. X Vserossiyskaya shkola-seminar aspirantov, studentov i molodykh uchenykh* [Information Technology, Simulation, and Computer-Aided Designing. The 10th Russian Discussion Group of Postgraduates, Students, and Young Scientists]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2018, pp. 46–48.

11. H. Kume. *Statisticheskie metody povysheniya kachestva* [Statistical Methods for Quality Improvement]. Moscow, Finansy i Statistika Publ., 1990. 304 p.

12. GOST R 50779.41–96. *Statisticheskie metody. Kontrolnye karty dlya arifmeticheskogo srednego s preduprezhdayushchimi granitsami* [State Standard 50779.41–96. Statistical Methods. Control Charts for Arithmetic Average with Warning Limits]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov Publ., 1996. 28 p.

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

14. Kliachkin V.N., Krashenninikov V.R., Kuvaikova Iu.E. *Prognozirovaniye i diagnostika stabilnosti funktsionirovaniya tekhnicheskikh obektov* [Forecasting and Diagnostics of Stable Operation of Technical Objects]. Moscow, Rusains Publ., 2020. 200 p.