

Анализ стабильности функционирования гидроагрегата по результатам вибромониторинга

А.В. Алексеева^{1,2}, И.Н. Карпунина³, В.Н. Клячкин²

¹Ульяновское конструкторское бюро приборостроения, ул. Крымова 10, Ульяновск, Россия, 432017

²Ульяновский государственный технический университет, Северный Венец 32, Ульяновск, Россия, 432027

³Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, ул. Можайского 8/8, Ульяновск, Россия, 432071

Аннотация. При стационарной работе гидроагрегата должна быть обеспечена стабильность его функционирования. Анализ данных вибромониторинга для коррелированных показателей проводится с использованием методов многомерного статистического управления процессами: контроль среднего уровня процесса проводится на основе алгоритма Хотеллинга, контроль многомерного рассеяния – по алгоритму обобщенной дисперсии. В работе исследуется эффективность алгоритма обобщенной дисперсии: насколько быстро контрольная карта обобщенной дисперсии реагирует на возможные нарушения стабильности вибраций гидроагрегата. Исследование показало, что стабильность функционирования гидроагрегата по критерию многомерного рассеяния не всегда адекватно оценивается с использованием стандартного алгоритма обобщенной дисперсии. Для повышения чувствительности контроля к возможным нарушениям процесса целесообразно модифицировать этот алгоритм путем поиска на соответствующей карте неслучайных структур, применения предупреждающей границы или использованием экспоненциально взвешенных скользящих средних на обобщенной дисперсии.

1. Введение

При стационарной работе гидроагрегата должна быть обеспечена стабильность его функционирования. Данные по вибрациям при проведении вибромониторинга в режиме реального времени поступают на стойку управления гидроагрегатом, и – при необходимости, когда система обработки информации о вибрациях прогнозирует их значимое повышение – производится снижение нагрузки. Анализ поступающих данных может осуществляться различными способами [1-2]. При мониторинге коррелированных показателей используются методы многомерного статистического управления процессами: контроль среднего уровня процесса проводится на основе алгоритма Хотеллинга, контроль многомерного рассеяния – по алгоритму обобщенной дисперсии. Через определенные промежутки времени берутся выборки и для каждой из них вычисляются значения статистики Хотеллинга и обобщенной дисперсии - определителя ковариационной матрицы контролируемых показателей; изменение этого параметра характеризует стабильность рассеяния процесса [3-4]. Подобный подход используется в самых разных областях [5-8].

Проводился анализ данных вибромониторинга гидроагрегата: процесс определялся десятью показателями: вибрациями нижнего X_1 и верхнего X_3 генераторного подшипника верхнего бьефа и на правом берегу X_2, X_4 , боем вала гидротурбины на нижнем бьефе X_5 и правом берегу X_6 , боем вала гидрогенератора X_7, X_8 , а также вибрациями крышки гидротурбины X_9, X_{10} .

На рисунке 1 показаны многомерные контрольные карты, построенные в системе Statistica [9] по двум коррелированным показателям X_6 - X_8 (между этими показателями имеет место значимая корреляция - по критерию Стьюдента на уровне значимости 0,05; выборочный коэффициент корреляции $r = 0,61$). Обе карты свидетельствуют о стабильности вибраций: значения статистики Хотеллинга не превышают граничного значения (13,756), обобщенная дисперсия также лежит в допустимых пределах (граничное значение 14,514).

Отметим, что приведенные граничные значения определяются статистическими методами и не являются предельными значениями для вибраций, это границы соответствующих доверительных интервалов. Их превышение свидетельствует о нарушении стабильности, однако при этом предельные значения еще не превышены. Своевременное реагирование на такие нарушения исключают возникновение аварийной ситуации.

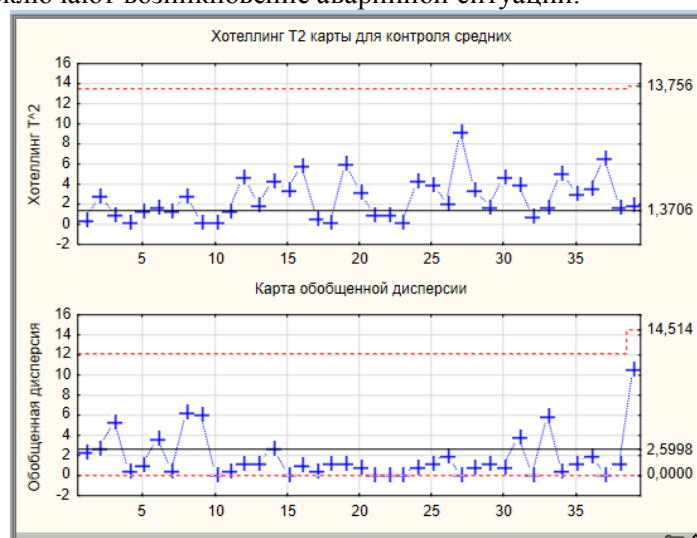


Рисунок 1. Многомерные карты.

Однако о нарушении процесса могут свидетельствовать не только выход контролируемой статистики за границу, но и различного типа структуры специального вида на карте. Кроме того, указанные методы не всегда достаточно оперативно реагируют на возможные нарушения процесса. Алгоритм Хотеллинга для контроля среднего уровня многомерного процесса в этом отношении изучен достаточно полно [3-4], чего нельзя сказать о контроле многомерного рассеяния.

Цель исследования – повышение эффективности вибромониторинга гидроагрегата по критерию многомерного рассеяния показателей его функционирования путем оценки чувствительности алгоритма обобщенной дисперсии: насколько быстро контрольная карта обобщенной дисперсии реагирует на возможные нарушения стабильности вибраций гидроагрегата.

2. Оценка чувствительности алгоритма обобщенной дисперсии

Для количественной оценки чувствительности алгоритма к возможным нарушениям процесса используется средняя длина серий – количество наблюдений от момента нарушения процесса до момента обнаружения этого нарушения.

Для проведения испытаний моделируется множество выборок, идентичных реальному процессу вибраций. Исходными данными являются вектор средних значений и ковариационная матрица коррелированных показателей. Используется алгоритм моделирования многомерных нормально распределенных случайных величин.

Для смоделированных выборок задаются различные варианты нарушений рассеяния процесса и по построенным картам обобщенной дисперсии определяется количество выборок от момента смоделированного нарушения до выхода процесса за контрольную границу. Усредняя эти данные по всему множеству выборок, получим среднюю длину серий.

На рисунке 2 показаны результаты проведенных испытаний при контроле многомерного рассеяния для двух коррелированных показателей. Моделировалось скачкообразное увеличение рассеяния процесса в 1,25 раза (выборочное значение определителя ковариационной матрицы умножалось на $d = 1,25$), в 1,5, в 1,75 и в 2 раза. Соответствующие значения d отложены на графике по горизонтальной оси. По вертикали показаны значения средней длины серий $L(d)$, рассчитанные по 1000 смоделированных выборок.

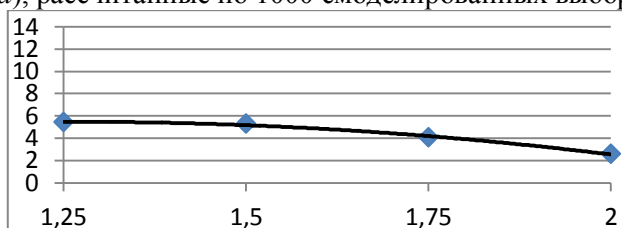


Рисунок 2. Средняя длина серий по результатам испытаний.

Результаты испытаний (опытные точки) аппроксимированы регрессионной параболической зависимостью, построенной в среде электронных таблиц Excel (линия тренда):

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

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,993$ свидетельствует о высоком качестве построенной модели. Используя эту зависимость и зная, какое увеличение рассеяния является опасным (или критичным) для рассматриваемого объекта, можно оценить качество алгоритма обобщенной дисперсии и внести корректировки в процесс контроля многомерного рассеяния.

Аналогичные результаты получены и для других наборов коррелированных показателей.

Предположим, что при контроле двух показателей вибраций опасным является скачкообразное увеличение рассеяния в 1,6 раз. Тогда из приведенной формулы следует, что карта обобщенной дисперсии обнаружит такое нарушение через $L(1,6) = 4,8$ выборок. Иногда такое значение недопустимо: за это время вибрации гидроагрегата могут вызвать нежелательные последствия. В этом случае необходимо изменить технологию контроля для повышения его чувствительности.

3. Методы повышения чувствительности алгоритма обобщенной дисперсии

Для повышения эффективности контроля можно использовать несколько различных подходов: провести анализ неслучайных структур на карте обобщенной дисперсии, ввести дополнительно предупреждающую границу, применить карту экспоненциально взвешенных скользящих средних на обобщенной дисперсии.

При анализе неслучайных структур на карте обобщенной дисперсии исходят из того, что алгоритм обобщенной дисперсии базируется на использовании нормального распределения (правило трех сигма), поэтому для обнаружения нарушений могут быть использованы практически те же типы структур, что и для карты Шухарта [11]. Промежуток между центральной линией и верхней контрольной границей делится на три части, каждая – шириной по одному стандартному отклонению. Неслучайными структурами, вероятность появления которых соизмерима с вероятностью ложной тревоги, являются (рисунок 3):

- а) выход хотя бы одной точки за контрольные границы,
- б) выход хотя бы двух из трех последовательных точек, лежащих выше центральной линии, за двухсигмовые пределы,
- в) выход по меньшей мере четырех из пяти последовательных точек, лежащих выше центральной линии, за пределы одной сигмы,
- г) шесть убывающих или возрастающих точек подряд (тренд),
- и другие.

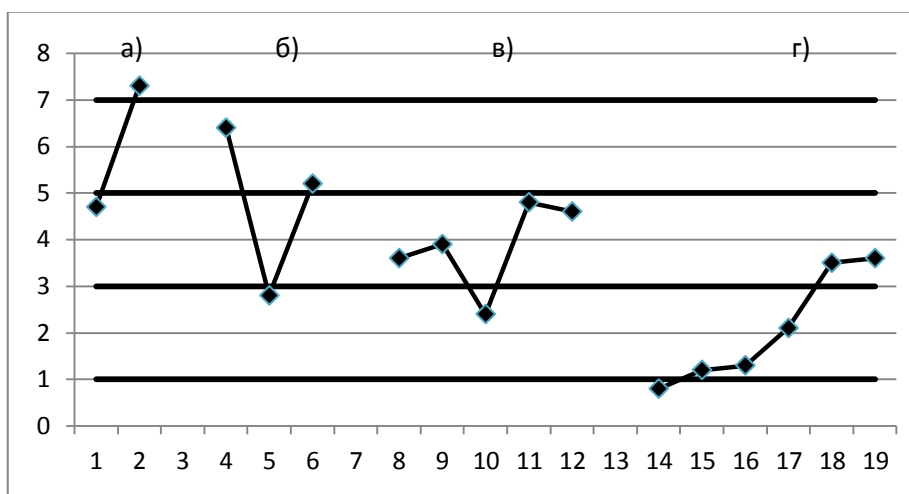


Рисунок 3. Неслучайные структуры на карте обобщенной дисперсии.

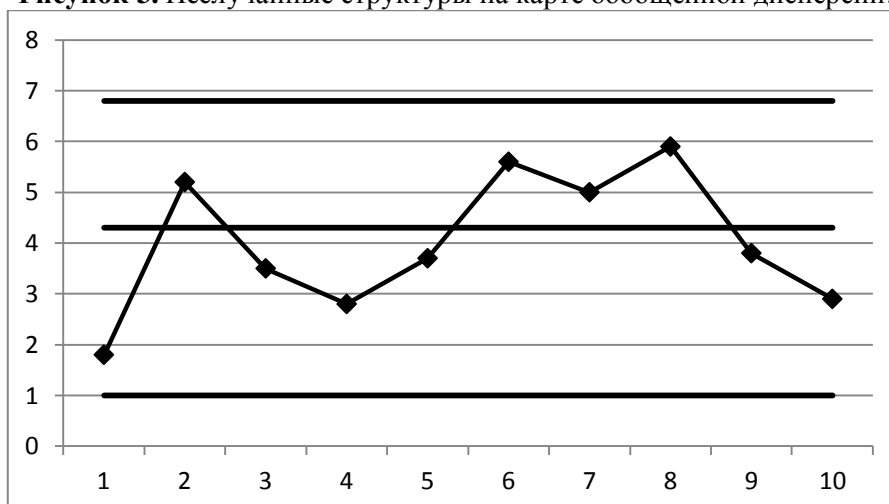


Рисунок 4. Три точки подряд между предупреждающей и контрольной границами на карте обобщенной дисперсии.

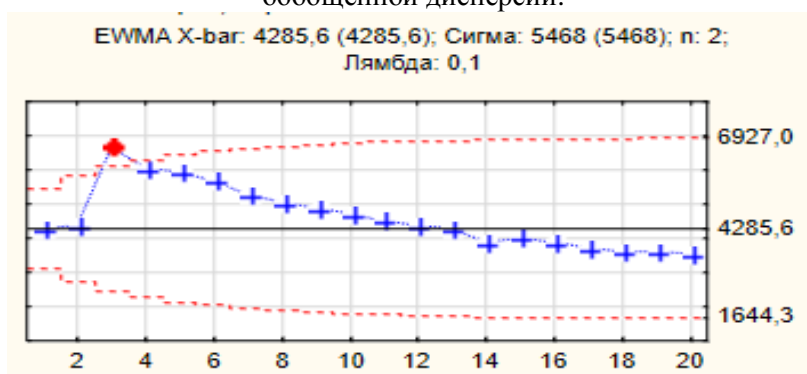


Рисунок 5. Карта экспоненциально взвешенных скользящих средних на обобщенной дисперсии.

Повышению чувствительности карты обобщенной дисперсии способствует и применение предупреждающей границы (рисунок 4). Положение такой границы оценивается исходя из того, сколько точек между предупреждающей и контрольной границами считается нарушением процесса (обычно две, три или четыре). Расчет положения предупреждающей границы проводится с использованием аппарата марковских цепей по аналогии с расчетом такой границы для карт средних значений [12].

Еще один подход, обеспечивающий при определенных условиях повышение эффективности контроля рассеяния, - это использование карт экспоненциально взвешенных скользящих средних на обобщенной дисперсии (рисунок 5). Испытания показывают, что такая карта быстрее реагирует на скачкообразное увеличение рассеяния по сравнению с обычной картой обобщенной дисперсии.

4. Заключение

Проведенное исследование показало, что стабильность функционирования гидроагрегата по критерию многомерного рассеяния вибраций при вибромониторинге не всегда адекватно оценивается с использованием стандартного алгоритма обобщенной дисперсии. Увеличение рассеяния часто обнаруживается через недопустимо большой промежуток времени, при котором вибрации могут вызвать нежелательные последствия. Для повышения чувствительности контроля к возможным нарушениям процесса целесообразно модифицировать этот алгоритм путем поиска на соответствующей карте неслучайных структур, применения предупреждающей границы или использованием экспоненциально взвешенных скользящих средних на обобщенной дисперсии.

5. Благодарности

Исследование выполнено при поддержке совместного гранта РФФИ и Правительства Ульяновской области, проект 18-48-730001.

6. Литература

- [1] Стандарт организации НП «Инновации в электроэнергетике». Гидроэлектростанции. Методика оценки технического состояния основного оборудования. СТО 70238424.27.140.001-2011.
- [2] Стандарт организации ОАО «РусГидро». Гидроагрегаты вертикальные. Методические указания по проверке и устранению дефектов центровки. СТО РусГидро 02.01.91-2013.
- [3] Montgomery, D.C. Introduction to statistical quality control / D.C. Montgomery – New York: John Wiley and Sons, 2009. – 754 p.
- [4] Ryan, T.P. Statistical methods for quality improvement / T.P. Ryan – New York: John Wiley and Sons, 2011. – 687 p.
- [5] Клячкин, В.Н. Прогнозирование состояния технического объекта на основе кусочно-линейных регрессий / В.Н. Клячкин, Д.С. Бубырь // Радиотехника. – 2014. – № 7. – С. 137-140.
- [6] Клячкин, В.Н. Система оценки кредитоспособности заемщиков и прогнозирования возврата кредитов / В.Н. Клячкин, Ю.С. Шунина // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – № 11. – С. 45-51.
- [7] Клячкин, В.Н. Система статистического контроля многопараметрического технологического процесса / В.Н. Клячкин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 10. – С. 30-33.
- [8] Клячкин, В.Н. Оценка стабильности показателей качества при очистке питьевой воды / В.Н. Клячкин, А.Д. Барт // Экологические системы и приборы. – 2017. – № 8. – С. 14-20.
- [9] Боровиков, В. STATISTICA: искусство анализа данных. Для профессионалов – СПб.: Питер, 2001. – 656 с.
- [10] García-Díaz, J.C. The 'effective variance' control chart for monitoring the dispersion process with missing data / J.C. García-Díaz // Industrial Engineering. – 2007. – Vol. 1(1). – P. 40-45.
- [11] Уиллер, Д. Статистическое управление процессами Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Д.Уиллер, Д. Чамберс – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с.
- [12] ГОСТ Р 50779.41-96 (ИСО 7873-93). Статистические методы. Контрольные карты для арифметического среднего с предупреждающими границами. Издательство стандартов, 1996.

Analysis of the stability of the hydraulic unit according to the results of vibration monitoring

A.V. Alekseeva^{1,2}, I.N. Karpunina³, V.N. Klyachkin²

¹Ulyanovsk Design Bureau of Instrumentation, Krymova street 10, Ulyanovsk, Russia, 432017

²Ulyanovsk State Technical University, Severny Venets 32, Ulyanovsk, Russia, 432027

³Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after Chief Air Marshal B.P. Bugaev, Mozhaisky street 8/8, Ulyanovsk, Russia, 432071

Abstract. During stationary operation of the hydraulic unit, the stability of its operation must be ensured. The analysis of vibration monitoring data for correlated indicators is carried out using methods of multivariate statistical process control: the average level of the process is controlled based on the Hotelling algorithm, multivariate scattering control is performed using the generalized dispersion algorithm. The paper investigates the effectiveness of the generalized dispersion algorithm: how quickly the control chart of the generalized dispersion responds to possible disturbances in the vibration stability of the hydraulic unit. The study showed that the stability of the operation of a hydraulic unit by the criterion of multivariate scattering is not always adequately estimated using the standard generalized dispersion algorithm. To increase the sensitivity of the control to possible process disturbances, it is advisable to modify this algorithm by searching for non-random structures on the corresponding chart, applying a warning boundary, or using exponentially weighted moving averages on the generalized variance.