

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 681.518.5

doi:10.21685/2307-4205-2021-1-4

СТАТИСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СТАБИЛЬНОСТИ ВИБРАЦИЙ ГИДРОАГРЕГАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

В. Н. Клячкин¹, И. Н. Карпунина²

¹ Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

² Ульяновский институт гражданской авиации, Ульяновск, Россия

¹ v_kl@mail.ru, ² karpunina531@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цель.* Диагностика технического состояния гидроагрегата производится по результатам вибромониторинга. Стабильность функционирования гидроагрегата в значительной мере зависит от уровня его вибраций. Данные по вибрациям поступают на сервер сбора данных через стойку виброконтроля. Далее в режиме реального времени в виде дискретного сигнала они поступают на стойку управления гидроагрегатом, с помощью которой изменяется нагрузка (при слишком больших вибрациях) или происходит останов агрегата (если вибрации достигают критических значений). При вибромониторинге гидроагрегата контролировались десять показателей: вибрации нижнего генераторного подшипника верхнего бьефа, соответствующие вибрации верхнего генераторного подшипника, бой вала гидротурбины и вала гидрогенератора, вибрации крышки гидротурбины. Выход вибраций за допустимые границы, как правило, свидетельствует о нарушении работоспособности гидроагрегата. *Методы.* Для анализа стабильности вибраций могут быть использованы различные подходы. Возможно прогнозирование вибраций на заданный горизонт с использованием систем временных рядов. Еще один метод – использование машинного обучения для бинарной классификации состояния агрегата по результатам обучающей выборки: стабилен он или нестабилен. В настоящей работе для оценки стабильности гидроагрегата используется статистический контроль процессов. Контрольные карты Шухарта для оценки стабильности среднего уровня и рассеяния процесса применяются для независимых показателей. Часть контролируемых показателей вибраций может быть независима от других, однако в общем случае между показателями имеют место значимые корреляционные связи. В такой ситуации применяются многомерные методы, в частности, для контроля стабильности среднего уровня процесса используют карты Хотеллинга. Статистическое управление процессом состоит в выявлении неслучайных нарушений; при этом управляющее воздействие применяется тогда, когда вибрации еще в пределах допуска, но некоторые статистические характеристики дают основание предполагать наличие неслучайной причины, которая приведет к увеличению уровня вибраций. Карта Хотеллинга не всегда адекватно реагирует на возможные нарушения процесса: иногда ее реакция слишком замедленна, а иногда и вообще нарушение процесса проходит незамеченным. Показано, что выходом из этой ситуации может быть применение метода главных компонент с построением карт Шухарта. *Результаты и выводы.* Показано, что в ряде случаев карты

на главных компонентах оказываются эффективнее, чем карты Хотеллинга, обычно применяемые при многомерном статистическом контроле. Это обстоятельство, конечно, не исключает использование карты Хотеллинга, которая во многих ситуациях показывает оперативное выявление нарушений процесса. Например, смещение по двум показателям одновременно было обнаружено картой Хотеллинга и не обнаружено картами на главных компонентах. Представляется целесообразным разработка информационной системы, которая по обучающей выборке результатов вибромониторинга для конкретного гидроагрегата с учетом особенностей его функционирования (т.е. оценки того, какие нарушения опасны именно для этого объекта) в автоматическом режиме обеспечивала бы проведение оперативного контроля стабильности вибраций, а также выдавала бы рекомендации по реагированию на диагностированные контрольными картами нестабильности процесса.

Ключевые слова: гидроагрегат, вибромониторинг, стабильность функционирования, контрольная карта, метод главных компонент

Для цитирования: Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Статистический контроль стабильности вибраций гидроагрегата с использованием метода главных компонент // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 41–48. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-4

STATISTICAL CONTROL OF HYDRO-UNIT VIBRATIONS STABILITY USING THE PRINCIPAL COMPONENTS METHOD

V.N. Klyachkin¹, I.N. Karpunina²

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

² Ulyanovsk Institute of Civil Aviation, Ulyanovsk, Russia

¹ v_kl@mail.ru, ² karpunina531@yandex.ru

Abstract. Background. Diagnostics of the technical condition of the hydraulic unit is carried out according to the results of vibration monitoring. The stability of the operation of a hydraulic unit largely depends on the level of its vibrations. Vibration data is sent to the data collection server through the vibration monitoring rack. Then, in real time, in the form of a discrete signal, they arrive at the control unit of the hydraulic unit, with which the load changes (with too large vibrations) or the unit stops (if the vibrations reach critical values). During vibration monitoring of the hydraulic unit, ten indicators were controlled: vibration of the lower generator bearing of the upper pool, the corresponding vibration of the upper generator bearing, the battle of the shaft of the turbine and the shaft of the generator, vibration of the cover of the turbine. Exit of vibrations beyond the permissible limits, as a rule, indicates a violation of the operability of the hydraulic unit. **Methods.** Various approaches can be used to analyze vibration stability. It is possible to predict vibrations to a given horizon using time series systems. Another method is the use of machine learning for binary classification of the state of the unit according to the results of the training sample: it is stable or unstable. In the present work, statistical control of processes is used to assess the stability of a hydraulic unit. Shewhart control charts for assessing average level stability and process dispersion are used for independent indicators. Some of the controlled vibration indicators can be independent of others, however, in the general case, significant correlation relationships take place between the indicators. In this situation, multidimensional methods are used, in particular, Hotelling charts are used to control the stability of the average level of the process. Statistical process control is to identify non-random violations; in this case, the control action is applied when the vibrations are still within the tolerance, but some statistical characteristics give reason to assume that there is a nonrandom reason that will lead to an increase in the level of vibrations. The Hotelling chart does not always adequately respond to possible violations of the process: sometimes its reaction is too slow, and sometimes even the violation of the process goes unnoticed. It is shown that the way out of this situation can be the use of the method of principal components with the construction of Shewhart charts. **Results.** It is shown that in some cases the charts on the principal components are more effective than the Hotelling charts, which are usually used in multidimensional statistical control. This circumstance, of course, does not exclude the use of the Hotelling charts, which in many situations shows the prompt detection of process violations. For example, a bias in two indicators was simultaneously detected by the Hotelling charts and not detected by maps on the main components. It seems advisable to develop an information system that, according to the training sample of vibration monitoring results for a particular hydraulic unit, taking into account the features of its functioning (that is, assessing which violations are dangerous for this particular object) in automatic mode, would provide operational monitoring of vibration stability, and would also give recommendations to respond to process instabilities diagnosed with control charts.

Keywords: hydraulic unit, vibromonitoring, stability of operation, control chart, principal components method

For citation: Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Statistical control of hydro-unit vibrations stability using the principal components method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;1:41–48. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-4

Постановка задачи

Диагностика технического состояния гидроагрегата производится по результатам вибромониторинга. Стабильность функционирования гидроагрегата в значительной мере зависит от уровня его вибраций. Данные по вибрациям поступают на сервер сбора данных через стойку виброконтроля. Далее в режиме реального времени в виде дискретного сигнала они поступают на стойку управления гидроагрегатом, с помощью которой изменяется нагрузка (при слишком больших вибрациях) или происходит останов агрегата (если вибрации достигают критических значений)¹.

При вибромониторинге гидроагрегата контролировались десять показателей: вибрации нижнего генераторного подшипника верхнего бьефа и на правом берегу, соответствующие вибрации верхнего генераторного подшипника, бой вала гидротурбины и вала гидрогенератора, вибрации крышки гидротурбины. Выход вибраций за допустимые границы, как правило, свидетельствует о нарушении работоспособности гидроагрегата².

Для анализа стабильности вибраций могут быть использованы различные подходы. Возможно прогнозирование вибраций на заданный горизонт с использованием систем временных рядов [1–3]. Еще один метод – использование машинного обучения для бинарной классификации состояния агрегата по результатам обучающей выборки: стабилен он или не стабилен [4].

В настоящей работе для оценки стабильности гидроагрегата используется статистический контроль процессов [5–9]. Контрольные карты Шухарта для оценки стабильности среднего уровня и рассеяния процесса применяются для независимых показателей. Часть контролируемых показателей вибраций может быть независима от других, однако в общем случае между показателями имеют место значимые корреляционные связи. В такой ситуации применяются многомерные методы, в частности, для контроля стабильности среднего уровня процесса используют карты Хотеллинга. При необходимости контроля стабильности многомерного рассеяния используются карты обобщенной дисперсии: рассеяние контролируется через значения определителя ковариационной матрицы.

Статистическое управление процессом состоит в выявлении неслучайных нарушений; при этом управляющее воздействие применяется тогда, когда вибрации еще в пределах допуска, но некоторые статистические характеристики дают основание предполагать наличие неслучайной причины, которая приведет к увеличению уровня вибраций.

Карта Хотеллинга не всегда адекватно реагирует на возможные нарушения процесса: иногда ее реакция слишком замедленна, а иногда и вообще нарушение процесса проходит незамеченным. В настоящей статье показано, что выходом из этой ситуации может быть применение метода главных компонент с построением карт Шухарта.

Контроль стабильности вибраций с помощью карты Хотеллинга

Применение контрольной карты Хотеллинга для оценки стабильности вибраций предполагает расчет для каждой t -й мгновенной выборки ($t = 1, \dots, m$) статистики [10, 11]

$$T_t^2 = n(\bar{X}_t - \mu_0)^T S^{-1}(\bar{X}_t - \mu_0), \quad (1)$$

где n – объем мгновенной выборки (в данном исследовании принято $n = 5$, количество выборок $m = 20$); $\bar{X}_t$ – вектор средних, $\bar{X}_t = (\bar{x}_{t1}, \bar{x}_{t2}, \dots, \bar{x}_{tp})^T$, $\bar{x}_{tj}$ – среднее значение в t -й мгновенной выборке по j -му показателю ($j = 1, \dots, p$), в нашем случае количество контролируемых показателей $p = 10$; μ_0 – вектор целевых средних, $\mu_0 = (\mu_1 \dots \mu_p)^T$, где

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.

$$\mu_j = \frac{1}{mn} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ijt}, \quad (2)$$

x_{ijt} – результат i -го наблюдения за вибрациями по j -му показателю в выборке t .

Оценки компонент ковариационной матрицы размерности $p \times p$, определяющие рассеяние параметров и степень тесноты их связи, вычисляются по формуле

$$s_{jk} = \frac{1}{m(n-1)} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ijt} - \mu_j)(x_{ikt} - \mu_k), \quad (3)$$

$j, k = 1, \dots, p$.

На рис. 1 показана карта Хотеллинга, построенная с использованием системы Statistica [12]. Видим, что процесс стабилен по среднему уровню: на карте нет точек, выходящих за контрольную границу 35,66.

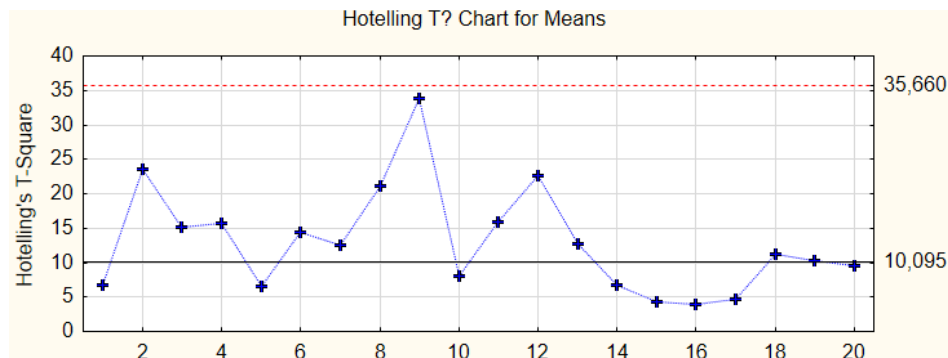


Рис. 1. Карта Хотеллинга по результатам вибромониторинга гидроагрегата

Заметим, что это значение (35,66) определяет границу доверительного интервала, поэтому выход за нее означает нарушение процесса с точки зрения статистики, но при этом выхода за допустимые пределы вибраций, как правило, нет: в этом состоит одно из основных преимуществ статистического контроля процессов – выход за допустимые пределы может быть своевременно предотвращен.

Моделирование нарушений процесса

Представляет интерес проследить, как карта Хотеллинга реагирует на возможные нарушения процесса. Наиболее распространенными нарушениями с точки зрения стабильности среднего уровня вибраций является скачкообразное или постепенное изменение среднего уровня (тренд). Скорость реакции карты на нарушение характеризуется с помощью средней длины серий – количества наблюдений от момента нарушения процесса до момента его обнаружения. При этом возможны нарушения как по одному из показателей вибраций, так и одновременно по нескольким.

Смоделируем скачкообразное нарушение процесса, например, по первому показателю, на одно стандартное отклонение. Значения числовых характеристик всех десяти показателей вибраций показаны на рис. 2 (количество наблюдений, среднее значение, минимум, максимум и стандартное отклонение). Ко всем значениям первого показателя, начиная, например, со второго наблюдения, прибавим по одному стандартному отклонению ($s_1 = 0,47$) и построим соответствующую карту Хотеллинга (рис. 3).

Variable	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
Var1	100	3,89833	2,86667	5,30000	0,472193
Var2	100	3,76367	2,88333	5,20000	0,427396
Var3	100	4,32317	3,21667	5,65000	0,489450
Var4	100	4,40733	3,50000	5,75000	0,479655
Var5	100	16,15033	15,95000	16,41667	0,096632
Var6	100	17,95850	17,78333	18,08333	0,050391
Var7	100	16,11517	16,00000	16,45000	0,080511
Var8	100	15,98050	15,83333	16,08333	0,039643
Var9	100	2,91817	2,41667	3,91667	0,260213
Var10	100	2,81450	2,03333	4,96667	0,626311

Рис. 2. Числовые характеристики

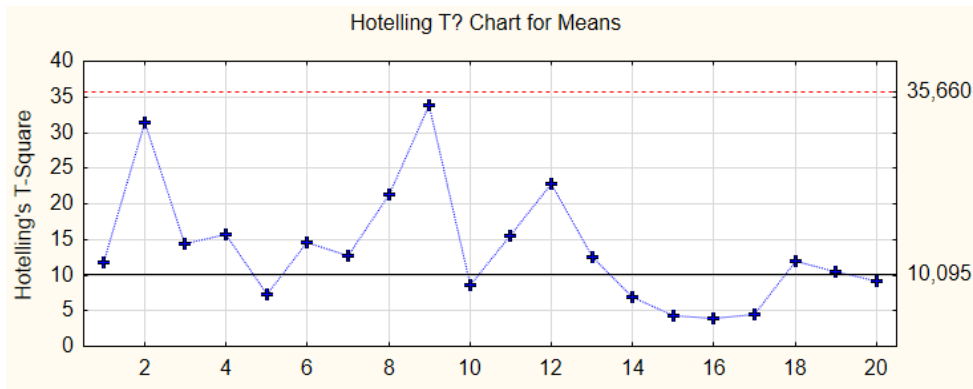


Рис. 3. Карта Хотеллинга после смещения среднего уровня процесса

Видим, что значения статистики Хотеллинга изменились, но нарушение процесса не выявлено: все точки на карте по-прежнему не выходят за контрольную границу. Это, конечно, не означает, что карта не реагирует на нарушения вообще. В этом можно убедиться, увеличив скачок среднего уровня на $1,5s_1$ или смоделировав нарушения по нескольким показателям одновременно.

В то же время проведенное моделирование тренда среднего уровня процесса, когда изменение уровня происходит не скачкообразно, а постепенно, показало, что выявляется он картой Хотеллинга с большим трудом: или при слишком большом тренде, или при тренде по множеству показателей одновременно.

Однако в конкретной ситуации нас может интересовать обнаружение именно такого нарушения, которое было задано в первом опыте: на одно стандартное отклонение по первому показателю. А карта проигнорировала это нарушение.

Можно предложить несколько вариантов для решения этой проблемы [13, 14]. Это использование:

- 1) карты Хотеллинга с учетом структур специального вида, свидетельствующих о нарушении процесса («неслучайное» расположение точек: несколько точек вблизи контрольной границы, резкие скачки между точками и др.);
- 2) карты с предупреждающей границей, когда попадание нескольких точек (обычно от двух до четырех) между предупреждающей и контрольной границами свидетельствует о нарушении процесса (расчет предупреждающей границы проводится с использованием аппарата марковских цепей);
- 3) карты многомерных экспоненциально взвешенных скользящих средних (используется экспоненциальное сглаживание);
- 4) карты многомерных кумулятивных сумм (значения статистики Хотеллинга накапливаются);
- 5) карты на главных компонентах.

Рассмотрим последний из перечисленных методов.

Переход к главным компонентам

В методе главных компонент результаты наблюдений за вибрациями X_j ($j = 1 \dots p$) преобразуются в главные компоненты F_j таким образом, чтобы главная компонента F_j представляла линейную комбинацию результатов наблюдений:

$$F = (X - \mu_0)V,$$

где μ_0 , как и ранее, – вектор средних; V – матрица преобразования.

При этом главные компоненты некоррелированы и упорядочены по величине дисперсии: первая главная компонента имеет максимальную дисперсию, последняя – минимальную.

Матрица V определяется решением оптимизационной задачи методом множителей Лагранжа. Каждый ее столбец представляет собой собственный вектор, соответствующий собственному числу λ_j (эти собственные числа являются дисперсиями главных компонент).

На рис. 4 показан график собственных чисел, построенный с использованием системы Statistica [12], называемый графиком каменистой осыпи, и иллюстрирующий вклад каждой из главных компонент: видно, что основную роль играют первые две главные компоненты.

Поскольку главные компоненты некоррелированы, для контроля стабильности вибраций вместо многомерных карт Хотеллинга можно использовать стандартные карты Шухарта [5, 13] по каждой главной компоненте отдельно. При этом часто достаточно рассмотреть карты только на тех главных компонентах, которые вносят основной вклад в процесс (в рассматриваемом примере – первые две компоненты).

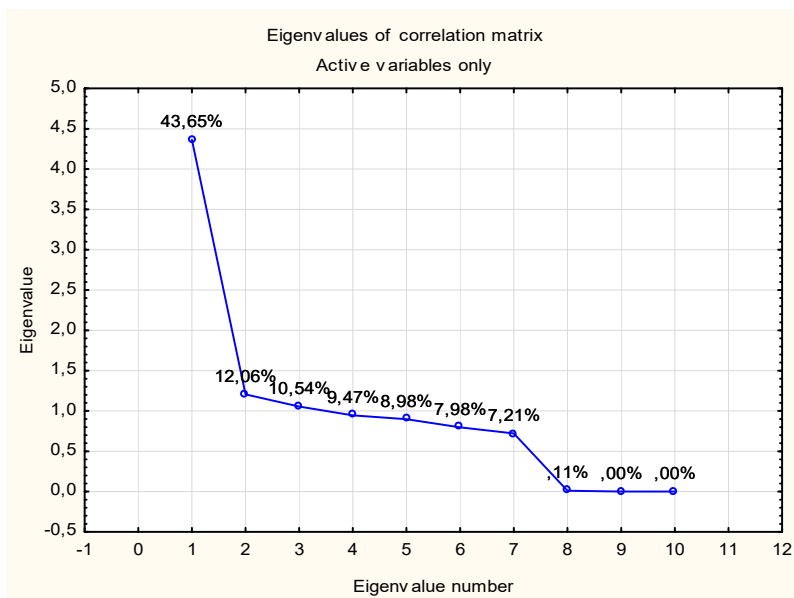


Рис. 4. График каменной осыпи (по вертикальной оси – значения собственных чисел)

На рис. 5 показаны карты Шухарта для средних значений и стандартных отклонений, построенные по первой главной компоненте. Видим, что карта средних обнаружила нарушение процесса в выборке 9 (выход точки за верхнюю контрольную границу, равную 1,25).

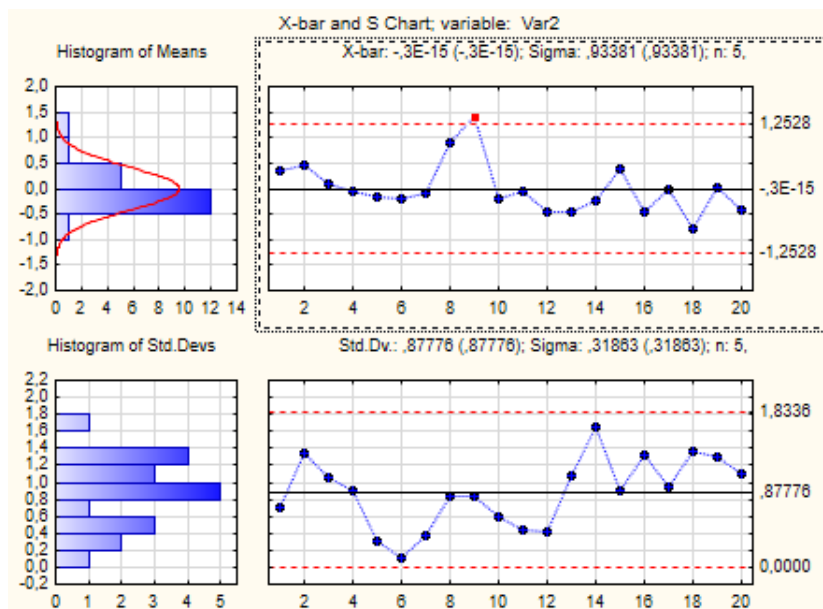


Рис. 5. Контрольные карты Шухарта

Напомним, что нарушение среднего уровня было смоделировано в выборке 2, т.е. длина серии в данном случае равна семи. На карте стандартных отклонений, характеризующей рассеяние процесса, нарушений нет: поскольку нарушения рассеяния не моделировались, этот результат вполне очевиден.

Таким образом, в отличие от карты Хотеллинга, карта Шухарта на главной компоненте не проигнорировала скачкообразное смещение среднего уровня процесса на заданную величину.

С другой стороны, обнаружение нарушения через семь выборок иногда может оказаться недопустимым и привести к аварийной ситуации: необходимы и более эффективные средства контроля.

Заключение

Для выявления нарушений в работе гидроагрегата, связанных с результатами вибромониторинга, предложено использовать контрольные карты на главных компонентах. Показано, что в ряде случаев эти карты оказываются эффективнее, чем карты Хотеллинга, обычно применяемые при многомерном статистическом контроле.

Это обстоятельство, конечно, не исключает использования карты Хотеллинга, которая во многих ситуациях показывает оперативное выявление нарушений процесса. Например, смещение по двум показателям одновременно было обнаружено картой Хотеллинга и не обнаружено картами на главных компонентах.

Задачи дальнейшего исследования можно сформулировать так. Необходимо провести статистические испытания для различных возможных нарушений процесса с тем, чтобы дать рекомендации о том, какими статистическими инструментами следует пользоваться в конкретной ситуации.

Критерием для принятия решения может служить средняя длина серий, оцененная по множеству смоделированных выборок. Проведенное исследование показало, что для разных типов нарушений целесообразно использовать различные подходы: контроль с применением обычной карты Хотеллинга или этой же карты с дополнительными возможностями (поиском структур специального вида или с предупреждающей границей), контроль на главных компонентах, использование экспоненциального сглаживания или других подходов.

Представляется целесообразной разработка информационной системы, которая по обучающей выборке результатов вибромониторинга для конкретного гидроагрегата с учетом особенностей его функционирования (т.е. оценки того, какие нарушения опасны именно для этого объекта) в автоматическом режиме обеспечивала бы проведение оперативного контроля стабильности вибраций, а также выдавала бы рекомендации по реагированию на диагностированные контрольными картами нестабильности процесса.

Список литературы

1. Юрков Н. К. Риски отказов сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 18–24.
2. Герасимов О. Н., Доросинский А. Ю. Методика текущего предупредительного статистического контроля // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 1. С. 30–32.
3. Кувайскова Ю. Е., Клячкин В. Н. Статистические методы прогнозирования. Ульяновск : УлГТУ, 2019. 197 с.
4. Klyachkin V. N., Kuvayskova J. E., Zhukov D. A. Aggregated Classifiers for State Diagnostics of the Technical Object // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. IEEE. 2019.
5. Уиллер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами ; пер. с англ. // Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. М. : Альпина Бизнес Букс, 2009. 409 с.
6. Montgomery D. C. Introduction to statistical quality control. New York : John Wiley and Sons, 2009. 754 p.
7. Клячкин В. Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. М. : Физматлит, 2011. 196 с.
8. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview // Quality and reliability Engineering International. 2007. Vol. 23. P. 517–523.
9. Ryan T. P. Statistical methods for quality improvement. New York : John Wiley and Sons, 2011. 687 p.
10. Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Статистические методы оценки стабильности функционирования технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2. С. 36–42.
11. Клячкин В. Н., Кравцов Ю. А., Святова Т. И. Методы повышения эффективности многомерного статистического контроля // Наукоемкие технологии. 2013. Т. 14, № 5. С. 053–058.
12. Боровиков В. STATISTICA: искусство анализа данных. Для профессионалов. СПб. : Питер, 2001. 656 с.
13. Адлер Ю. П., Шпер В. Л. Практическое руководство по статистическому управлению процессами. М. : Альпина Паблишер, 2019. 234 с.
14. Клячкин В. Н., Святова Т. И. Статистический контроль технологического рассеяния в многопараметрическом процессе // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 12. С. 22–25.

References

1. Yurkov N.K. Risks of complex system failures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;1:18–24. (In Russ.)
2. Gerasimov O.N., Dorosinskiy A.Yu. Methodology of current preventive statistical control. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;1:30–32. (In Russ.)
3. Kuvayskova Yu.E., Klyachkin V.N. *Statisticheskie metody prognozirovaniya = Statistical forecasting methods*. Ulyanovsk: UIGTU, 2019:197. (In Russ.)
4. Klyachkin V.N., Kuvayskova J.E., Zhukov D.A. Aggregated Classifiers for State Diagnostics of the Technical Object. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. IEEE*. 2019.
5. Uiller D., Chambers D. Statistical management of processes; trans. from English. *Optimizatsiya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta = Business Optimization using Shewhart Control Cards*. Moscow: Al'pina Biznes Buks, 2009:409. (In Russ.)
6. Montgomery D.C. *Introduction to statistical quality control*. New York: John Wiley and Sons, 2009:754.
7. Klyachkin V.N. *Modeli i metody statisticheskogo kontrolya mnogoparametricheskogo tekhnologicheskogo protsessa = Models and methods of statistical control of a multiparametric technological process*. Moscow: Fizmatlit, 2011:196. (In Russ.)
8. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview. *Quality and reliability Engineering International*. 2007;23:517–523.
9. Ryan T.P. *Statistical methods for quality improvement*. New York: John Wiley and Sons, 2011:687.
10. Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Statistical methods for assessing the stability of technical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;2:36–42. (In Russ.)
11. Klyachkin V.N., Kravtsov Yu.A., Svyatova T.I. Methods for improving the effectiveness of multidimensional statistical control. *Naukoemkie tekhnologii = High-tech technologies*. 2013;14(5):053–058. (In Russ.)
12. Borovikov V. *STATISTICA: iskustvo analiza dannykh. Dlya professionalov = STATISTICA: The Art of Data analysis. For professionals*. Saint-Petersburg: Piter, 2001:656. (In Russ.)
13. Adler Yu.P., Shper V.L. *Prakticheskoe rukovodstvo po statisticheskomu upravleniyu protsessami = Practical guide to Statistical Process Management*. Moscow: Al'pina Publisher, 2019:234. (In Russ.)
14. Klyachkin V.N., Svyatova T.I. Statistical control of technological scattering in a multiparameter process. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii = Automation and modern technologies*. 2013;12:22–25. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Клячкин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной математики
и информатики,
Ульяновский государственный
технический университет
(Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
E-mail: v_kl@mail.ru

Vladimir N. Klyachkin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department of applied mathematics
and informatics,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severny Venec street, Ulyanovsk, Russia)

Ирина Николаевна Карпунина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин,
Ульяновский институт гражданской авиации
(Россия, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8)
E-mail: karpunina53l@yandex.ru

Irina N. Karpunina

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of sub-department
of general professional disciplines,
Ulyanovsk Institute of Civil Aviation
(8/8 Mozhaitskiy street, Ulyanovsk, Russia)