

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

УДК 519.248: 681.518.5

DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-5

В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

V. N. Klyachkin, I. N. Karpunina

STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING THE STABILITY OF FUNCTIONING OF TECHNICAL SYSTEMS

Аннотация. Актуальность и цели. Стабильность функционирования системы часто определяет ее работоспособность. Нарушение стабильности может привести к остановке системы или возникновению аварийной ситуации. Важной задачей является скорейшее обнаружение нарушения стабильности процесса функционирования. **Методы.** Нарушения проявляются в виде изменения статистических характеристик, поэтому для их обнаружения могут быть использованы методы и алгоритмы статистического контроля процессов. Такой подход позволяет выявить нарушение до того, как произошел выход контролируемых показателей за допустимые пределы. При этом, как правило, одновременно проводится мониторинг среднего уровня процесса и его рассеяния. Выбираются статистические инструменты для контроля: для независимых показателей используются стандартные карты Шухарта, для коррелированных – методы и алгоритмы, основанные на применении многомерной статистики Хотеллинга и обобщенной дисперсии. **Результаты.** Проведенное исследование позволило предложить следующую методику оценки стабильности функционирования технических

Abstract. Background. Stability of functioning of the system often determines its performance. Instability can lead to system or stop the occurrence of an emergency situation. An important task is the early detection of violations of process stability operations. **Materials and methods.** Violations are manifested in the form of statistical characteristics, therefore, to find them can be used methods and algorithms for statistical process control. Such approach allows to reveal the violation occurred before exit controlled performance limits. Thus, as a rule, simultaneously monitoring and mid-level process and its dispersion. Selected statistical tools for control: for independent indicators used standard Shewhart's charts, for correlated methods and algorithms, based on the use of multivariate Hotelling's statistics and generalized variance. **Results.** This study allowed us to propose the following methodology for assessing the stability of technical systems: a study of working conditions analogical systems and identification of possible disturbances; calculation of basic statistical characteristics of the process; selection of statistical tools for follow-up depending on the alleged violations and the level of correlativeness of parameters; provodenie for continuous monitoring of the functioning

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект №16-48-732002.

систем: изучение условий работы аналогичных систем и выявление возможных нарушений стабильности функционирования; расчет основных статистических характеристик процесса; выбор статистических инструментов для последующего контроля в зависимости от предполагаемых нарушений и уровня коррелированности параметров; проведение постоянного мониторинга функционирования системы с целью диагностики нарушений стабильности. *Выводы.* Предлагаемая методика позволит своевременно обнаружить нарушение стабильности процесса функционирования технического объекта и предотвратить возможную аварийную ситуацию.

Ключевые слова: техническая диагностика, обнаружение нарушений, контрольная карта Шухарта, алгоритм Хотеллинга, обобщенная дисперсия.

of the system for diagnostics of stability. *Conclusions.* The proposed methodology would detect violation of process stability functioning of the technical object and prevent the possible emergency.

Key words: technical diagnostics, detection, Shewhart's control chart, Hotelling's algorithm, generalized variance.

Введение

Постоянный рост сложности технических систем требует разработки новых методов диагностики их состояния. Обеспечение безопасности функционирования технических систем связано с оперативным предотвращением перехода штатных ситуаций в аварийные [1]. Стабильность функционирования системы часто определяет ее работоспособность. Нарушение стабильности может привести к остановке системы или возникновению аварийной ситуации.

Важной задачей является скорейшее обнаружение нарушения стабильности процесса функционирования. Нарушения проявляются в виде изменения статистических характеристик, поэтому для их обнаружения могут быть использованы методы и алгоритмы статистического контроля процессов [2, 3]. Такой подход позволяет выявить нарушение до того, как произошел выход контролируемых показателей за допустимые пределы: при нормальном функционировании системы границы доверительных интервалов этих показателей существенно уже, чем границы допуска. При этом, как правило, одновременно проводится мониторинг среднего уровня процесса и его рассеяния.

Критерии стабильности процессов функционирования различны для технических систем разного назначения. Для системы водоочистки, например, основным показателем является качество очистки питьевой воды. В исследованной системе Санкт-Петербургского водоканала, например, контролируется восемь физико-химических показателей: мутность, цветность, содержание алюминия, хлоридов, остаточного хлора, значение pH, окисляемость и щелочность [4], таким образом, речь идет о диагностике многопараметрического процесса.

Стабильное функционирование гидроагрегата связано с обеспечением множества критериев, в частности, с уровнем вибраций [5], опять-таки вибромониторинг проводится с помощью множества датчиков вибраций. Запись вибраций проводилась в системе управления гидроагрегатом на Краснодарской ГЭС (Краснодарский край), контролировались биение вала и вибрация гидроагрегата. Процесс определяется десятью показателями.

Температурный режим компьютера также является лишь одним из критериев нормальной работы вычислительной системы. Исследование стабильности температурного режима проводилось по пяти факторам [6]: температурам центрального процессора, двух ядер, графического видеопроцессора и видеокарты.

Для разработки методики оценки стабильности функционирования технической системы проводится предварительный анализ результатов мониторинга, желательно в условиях нормального функционирования исследуемого объекта. При этом определяется уровень коррелированности показателей (с учетом значимости) и производится разбивка их на группы независимых и коррелированных [7, 8]. Выбираются статистические инструменты для контроля: для независимых показателей используются стандартные карты Шухарта [9, 10], для коррелированных – методы и алгоритмы, основанные на применении многомерной статистики Хотеллинга и обобщенной дисперсии [3, 11, 12].

Оценка стабильности независимых показателей

Для контроля стабильности некоррелированных показателей могут быть использованы карты Шухарта, например, для среднего уровня и стандартного отклонения [9, 10]. На карте средних значений откладывается среднее значение показателя контролируемого показателя X в t -й выборке ($t = 1, \dots, m$, m – количество выборок):

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ti}, \quad (1)$$

(x_{ti} – результат i -го наблюдения в t -й мгновенной выборке объема n), которое и откладывается на карте. Положение центральной линии определяется по формуле

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \bar{x}_t = \frac{1}{nm} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ti}. \quad (2)$$

Для оценки рассеяния вычисляется несмещенная дисперсия каждой мгновенной выборки:

$$s_t^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ti} - \bar{x}_t)^2; \quad (3)$$

$$\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m s_t. \quad (4)$$

Положение контрольных границ карты средних значений – верхней UCL и нижней LCL – определяется по формулам

$$\left. \begin{matrix} UCL \\ LCL \end{matrix} \right\} = \bar{\bar{x}} \pm A_3 \bar{s} \quad (5)$$

(A_3 – коэффициент, определяемый по таблице [9] в зависимости от объема выборки n).

На карте стандартных отклонений откладываются значения квадратного корня из дисперсий (3), центральная линия определяется формулой (4), а положение контрольной границы (как правило, используется только верхняя граница) определяется как

$$UCL = B_4 \bar{s} \quad (6)$$

(B_4 , как и A_3 , – табличный коэффициент).

На рис. 1 соответствующие карты показаны для одного из показателей вибраций гидроагрегата, построенные по формулам (1)–(6) в системе Statistica. Карты свидетельствуют о стабильности процесса: ни на карте средних, ни на карте стандартных отклонений нет точек, выходящих за контрольные границы.

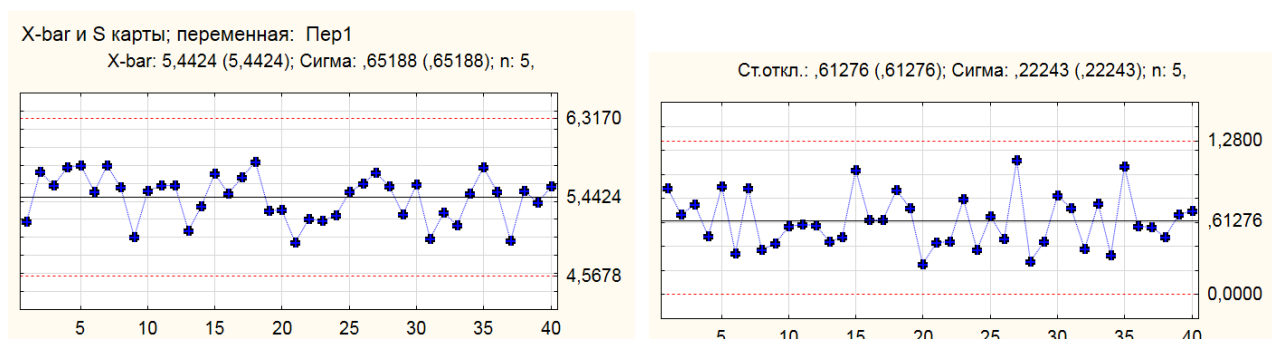


Рис. 1. Контрольные карты Шухарта для среднего уровня процесса и стандартного отклонения

Иногда проведение измерений связано с значительными техническими сложностями или большими затратами, в этом случае используются контрольные карты для индивидуальных значений: при этом объем мгновенной выборки $n = 1$. Такая ситуация имеет место, в частности, для си-

стемы водоочистки, где показатели качества питьевой воды контролируются один раз в сутки. Для характеристики рассеяния процесса в случае индивидуальных наблюдений строится карта скользящих размахов.

Оценка стабильности группы коррелированных показателей

При контроле p показателей, имеющих совместное нормальное распределение, для контроля среднего уровня многомерного процесса используется алгоритм Хотеллинга [3]: для каждой t -й мгновенной выборки ($t = 1, \dots, m$) вычисляется статистика

$$T_t^2 = n(\bar{x}_t - \mu_0)^T S^{-1}(\bar{x}_t - \mu_0), \quad (7)$$

где n – объем мгновенной выборки, $\bar{x}_t$ – вектор средних в мгновенных выборках, μ_0 – вектор целевых средних.

Оценки компонент ковариационной матрицы S определяются по формуле

$$s_{jk} = \frac{1}{m(n-1)} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ijt} - \mu_j)(x_{ikt} - \mu_k), j, k = 1, \dots, p. \quad (8)$$

Процесс считается стабильным при $T_t^2 < T_{кр}^2$, где

$$T_{кр}^2 = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{1-\alpha}(p, mn-m-p+1), \quad (9)$$

где $F_{1-\alpha}(k_1, k_2)$ – квантиль F -распределения Фишера с числами степеней свободы в числителе k_1 , в знаменателе – k_2 .

Построение многомерной карты Хотеллинга при проведении индивидуальных наблюдений предполагает расчет для каждого t -го наблюдения ($t = 1, \dots, m$) статистики

$$T_t^2 = (x_t - \bar{x})^T S^{-1}(x_t - \bar{x}). \quad (10)$$

При этом возникает проблема оценивания ковариационной матрицы S [13, 14]. При оценивании по всей выборке

$$S = \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m (x_t - \bar{x})(x_t - \bar{x})^T. \quad (11)$$

При этом критическое значение $T_{кр}^2$, определяющее положение границы карты Хотеллинга при контроле p показателей на уровне значимости α , основывается на бета-распределении

$$T_{кр}^2 = \frac{p(m+1)(m-1)}{m^2 - mp} \beta_{\alpha, p/2, (m-p-1)/2}, \quad (12)$$

где $\beta_{\alpha, p/2, (m-p-1)/2}$ – квантиль бета-распределения порядка α с числами степеней свободы $p/2$ и $(m-p-1)/2$.

Другой вариант – оценивание ковариационной матрицы по размахам в выборках: скользящий размах определяется по формуле

$$v_t = x_{t+1} - x_t, t = 1, \dots, m-1;$$

тогда вектор размахов

$$V^T = (v_1 v_2 \dots v_{m-1});$$

а оценка ковариационной матрицы

$$S = \frac{1}{2(m-1)} V^T V. \quad (13)$$

В этом случае статистика Хотеллинга имеет распределение хи-квадрат с p степенями свободы. Для расчета положения контрольной границы используются квантили этого распределения:

$$T_{kp}^2 = \chi_{1-\alpha}^2(p). \quad (14)$$

Проведенные исследования показали [4], что расчет по формулам (11), (12) эффективнее проводить на этапе анализа процесса, а по формулам (13), (14) – на этапе мониторинга.

На рис. 2 в качестве примера показана карта Хотеллинга для двух коррелированных показателей качества питьевой воды: значения pH и окисляемости, построенная с использованием соотношений (10)–(12). Процесс стабилен: на карте нет точек, выходящих за контрольную границу.

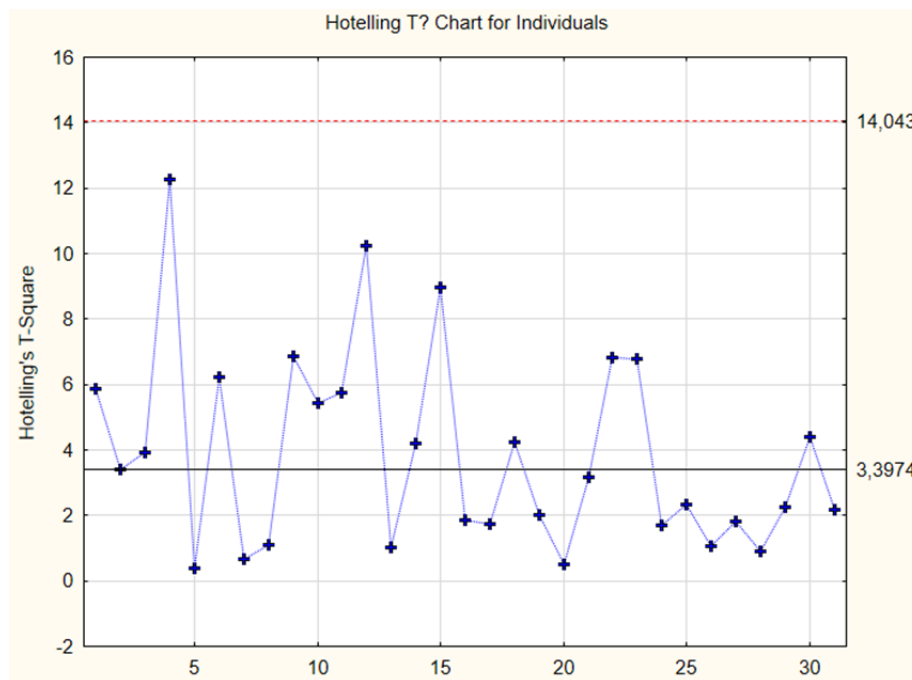


Рис. 2. Контрольная карта Хотеллинга

На практике при мониторинге процесса используют и другие критерии нестабильности процесса. Выход статистики Хотеллинга за контрольную границу – основной критерий нарушения стабильности процесса. Однако применение этого критерия далеко не всегда обеспечивает достаточно оперативное выявление значимых изменений процесса. Для повышения эффективности обнаружения изменений используется несколько подходов. Одним из них является выявление на карте структур специального вида, появление которых может свидетельствовать о нарушении процесса. Такими структурами могут быть тренд, приближение к оси абсцисс или к контрольной границе, резкие скачки значений статистики Хотеллинга, цикличность. Для выявления таких структур используется специальное программное обеспечение [15–17].

Основное назначение карты Хотеллинга – контроль среднего уровня многопараметрического процесса. Часто, как и для независимых показателей, необходим и контроль рассеяния процесса.

Контроль многомерного рассеяния сводится к проверке гипотезы о равенстве ковариационной матрицы процесса Σ заданной матрице Σ_0 . Используется обобщенная дисперсия [11, 12] – определитель ковариационной матрицы S_t , компоненты которой определяются по формулам (13), значение $|S_t|$ есть обобщенная дисперсия t -й мгновенной выборки. Вычисляются оценки средней ковариации по всей совокупности наблюдений

$$\bar{s}_{jk} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m s_{jkt}, \quad (15)$$

которые образуют ковариационную матрицу S ; ее определитель $|S|$ используется в качестве оценки целевой обобщенной дисперсии $|\Sigma_0|$.

Контрольные границы (положение границ критической области) для обобщенной дисперсии определяются из соотношений [12]:

$$m_{|s|} \pm u_{1-\alpha/2} \sigma_{|s|}, \quad (16)$$

где $u_{1-\alpha/2}$ – квантиль нормального распределения порядка $1 - \alpha/2$, α – уровень значимости; если принять значение, соответствующее правилу «трех сигма»: $\alpha = 0,0027$, тогда $u_{1-\alpha/2} = 3$; математическое ожидание обобщенной дисперсии $m_{|s|} = b_1 |\Sigma_0|$; стандартное отклонение $\sigma_{|s|} = \sqrt{b_2} |\Sigma_0|$; коэффициенты

$$b_1 = \frac{1}{(n-1)^p} \prod_{j=1}^p (n-j); \quad (17)$$

$$b_2 = \frac{1}{(n-1)^{2p}} \prod_{j=1}^p (n-j) \left[\prod_{k=1}^p (n-k+2) - \prod_{k=1}^p (n-k) \right], \quad (18)$$

тогда положение верхней UCL и нижней LCL границ обобщенной дисперсии определяется по формуле

$$\left. \begin{matrix} UCL \\ LCL \end{matrix} \right\} = |\Sigma_0| (b_1 \pm u_{1-\alpha/2} \sqrt{b_2}). \quad (19)$$

Из приведенных зависимостей следует, что построение карты обобщенной дисперсии по индивидуальным наблюдениям невозможно, необходимо иметь мгновенные выборки, объем которых хотя бы на единицу превышает количество контролируемых показателей.

На рис. 3 показана карта обобщенной дисперсии для трех коррелированных показателей температурного режима компьютера: *температуры графического процессора, видеокарты и центрального процессора*, построенная по формулам (15)–(19) в среде электронных таблиц Excel. Поскольку ведется контроль трех коррелированных показателей, использовано $n = 4$ (каждые четыре наблюдения рассматриваются как одна выборка).

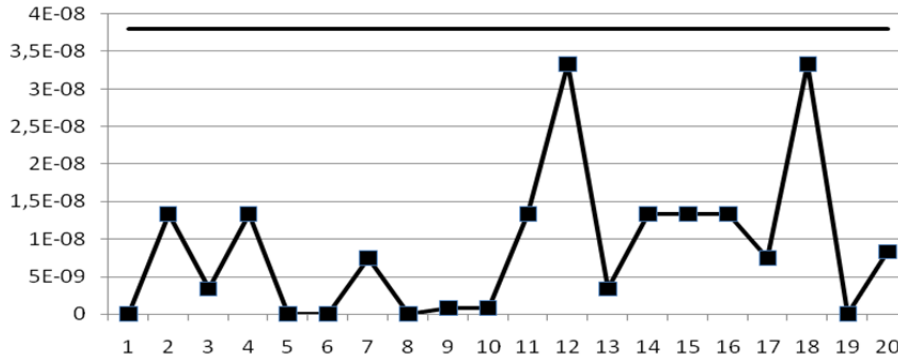


Рис. 3. Карта обобщенной дисперсии

Заключение

Проведенное исследование позволяет предложить следующую методику оценки стабильности функционирования технических систем:

- 1) изучаются условия работы аналогичных систем и выявляются возможные нарушения стабильности функционирования;
- 2) в условиях отлаженной (стабильной) работы системы снимают показания соответствующих датчиков и рассчитывают основные статистические характеристики: векторы средних значений и ковариационную матрицу;
- 3) выбирают набор возможных статистических инструментов для последующего контроля в зависимости от предполагаемых нарушений и уровня коррелированности параметров. Некоррелированные параметры контролируют инструментами на основе карты Шухарта, коррелированные – на основе статистики Хотеллинга и/или обобщенной дисперсии;
- 4) проводят постоянный мониторинг функционирования системы с целью диагностики нарушений стабильности.

Библиографический список

1. Юрков, Н. К. Риски отказов сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 18–24.
2. Герасимов, О. Н. Методика текущего предупредительного статистического контроля / О. Н. Герасимов, А. Ю. Доросинский // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 30–32.
3. Клячкин, В. Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса / В. Н. Клячкин. – М. : Физматлит, 2011. – 196 с.
4. 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.
5. Иванова, А. В. Статистическая обработка результатов вибромониторинга гидроагрегата / А. В. Иванова, И. Н. Карпунина, В. Н. Клячкин // Научный вестник УИГА. – 2017. – № 9. – С. 144–150.
6. Клячкин, В. Н. Оценка стабильности температурного режима компьютера / В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина, М. К. Федорова // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 3 (45). – С. 58–64.
7. Клячкин, В. Н. Статистические методы анализа данных / В. Н. Клячкин, Ю. Е. Кувайскова, В. А. Алексеева. – М. : Финансы и статистика, 2016. – 240 с.
8. Клячкин, В. Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии / В. Н. Клячкин. – М. : Финансы и статистика, ИНФРА-М, 2009. – 304 с.
9. ГОСТ Р 50779.42-99 (ИСО 8258-91). Статистические методы. Контрольные карты Шухарта.
10. Уиллер, Д. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Д. Уиллер, Д. Чамберс. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с.
11. Montgomery, D. C. Introduction to statistical quality control / D. C. Montgomery. – New York : John Wiley and Sons, 2009. – 754 p.
12. Святова, Т. И. Многомерный статистический контроль технологического рассеяния процесса / Т. И. Святова, В. Н. Клячкин // Радиотехника. – 2014. – № 11. – С. 123–126.
13. Sullivan, J. H. A Comparison of Multivariate Quality Control Charts for Individual Observations / J. H. Sullivan, W. H. Woodall // Journal of Quality Technology. – 1996. – Vol. 28. – P. 398–408.
14. Williams, J. D. Distribution of Hotelling's T² Statistic Based on the Successive Difference Estimator / J. D. Williams, W. H. Woodall, J. H. Sullivan // Journal of Quality Technology. – 2006. – Vol. 38. – P. 217–229.
15. Клячкин, В. Н. Обнаружение нарушений при многомерном статистическом контроле технологического процесса / В. Н. Клячкин, Ю. А. Кравцов // Программные продукты и системы. – 2016. – № 3. – С. 192–197.
16. Горячев, Н. В. Структура автоматизированной лаборатории исследования теплопроводов / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 119–120.
17. Горячев, Н. В. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплопровода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 242–243.

Клячкин Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра прикладной математики и информатики,
Ульяновский государственный
технический университет
(432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
Email: v_kl@mail.ru

Карпунина Ирина Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра общепрофессиональных дисциплин,
Ульяновский институт гражданской авиации
(432071, Россия, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8)
Email: karpunina53l@yandex.ru

Klyachkin Vladimir Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of applied mathematics and informatics,
Ulyanovsk State Technical University
(432027, 32 Severny Venec street, Ulyanovsk, Russia)

Karpunina Irina Nikolaevna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of general professional disciplines,
Ulyanovsk Institute of Civil Aviation
(432071, 8/8 Mozhaitskiy street, Ulyanovsk, Russia)

УДК 519.248: 681.518.5

Клячкин, В. Н.

Статистические методы оценки стабильности функционирования технических систем / В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 36–42. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-5.