

УДК 519.248

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ АГРЕГАТОВ****В.Н. Клячкин¹, И.Н. Карпунина²**¹Ульяновский государственный технический университет,²Ульяновский институт гражданской авиации

Работоспособность многих технических агрегатов определяется стабильностью функционирования. Нарушение стабильности может привести к отказу агрегата или возникновению аварийной ситуации. Поэтому важным является решение задачи скорейшего обнаружения такого нарушения. Например, вибрации агрегата можно контролировать с помощью сети датчиков. По показаниям этих датчиков необходимо диагностировать нарушение стабильности работы контролируемого объекта. Нарушения проявляются в виде изменения статистических характеристик, поэтому для обнаружения нарушений могут быть использованы методы и алгоритмы статистического контроля технологических процессов. Предложена методика оценки стабильности работы агрегата, включающая изучение условий работы аналогичных агрегатов и выявление возможных нарушений; съем показаний датчиков в условиях отлаженной (стабильной) работы агрегата, и расчет основных статистических характеристик: вектора средних значений и ковариационной матрицы (характеристики обучающей выборки); выбор возможных статистических инструментов для последующего контроля; расчет средней длины серий для различных статистических инструментов с учетом возможных нарушений; проведение статистических испытаний; отбор инструментов с минимальной длиной серий; постоянный мониторинг работы агрегата с целью диагностики нарушений стабильности.

Ключевые слова: карта Шухарта, многомерная карта Хотеллинга, обобщенная дисперсия, средняя длина серий.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-65-72

Введение

Работоспособность агрегата часто определяется стабильностью его функционирования. Нарушение стабильности может привести к остановке работы агрегата или возникновению аварийной ситуации, поэтому важным является решение задачи скорейшего обнаружения такого нарушения [1].

Диагностирование агрегатов позволяет определять их техническое состояние и прогнозировать сроки службы узлов. Своевременное обнаружение и устранение неисправностей в системах питания двигателей, агрегатов трансмиссии или ходовой части улучшает на 10...15 % топливно-экономические показатели и эксплуатационную мощность двигателя, на 20...30 % улучшает экологические показатели, повышает безопасность эксплуатации машины.

Вибрации гидроагрегатов можно контролировать с помощью сети датчиков. По показаниям этих датчиков необходимо диагностировать нарушение стабильности работы контролируемого объекта. Нарушения проявляются в виде измене-

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 2014/232 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности Минобрнауки России и при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-48-02038.

ния статистических характеристик, поэтому для их обнаружения могут быть использованы методы и алгоритмы статистического контроля технологических процессов [2–6].

Цель исследования – разработка методики оценки стабильности функционирования агрегата на основе анализа эффективности применения методов статистического контроля для диагностирования нарушений работы таких агрегатов.

1. Диагностика изменения среднего уровня процесса

Наиболее распространенными нарушениями процесса, связанными с изменением его среднего уровня, являются постоянное смещение (рис. 1, *а*) или тренд – постепенное уменьшение или увеличение среднего уровня (рис. 1, *б*). Для обнаружения такого типа нарушений при контроле одного параметра используют карты Шухарта для средних значений или индивидуальных наблюдений [3–5]. Более эффективен контроль предполагаемого постоянного изменения среднего уровня с помощью карт кумулятивных сумм. Эти карты могут быть построены вручную с использованием встроенных функций и графических средств электронных таблиц или с помощью специальных статистических пакетов (Statistica, SPSS и др.).

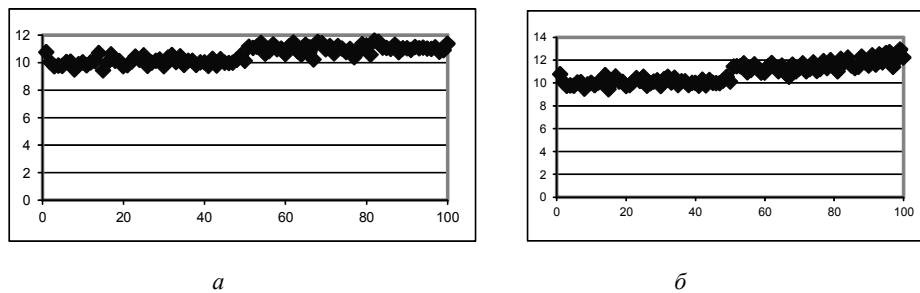


Рис. 1 – Моделирование возможных нарушений среднего уровня процесса (по горизонтальной оси – номер наблюдения, по вертикальной оси – контролируемая характеристика):

а – постоянное смещение; *б* – тренд

Fig. 1 – Modeling of potential violations of medium level process (on the horizontal axis is the number of observations, on the vertical axis-controlled):

a – the constant offset; *b* – trend

При контроле множества коррелированных параметров применяют многомерные карты Хотеллинга, а также основанные на статистике Хотеллинга алгоритмы экспоненциально взвешенных скользящих средних [4–9]. Для повышения эффективности карты Хотеллинга предложено несколько алгоритмов. Один из них – поиск структур специального вида, вероятность появления которых соизмерима с вероятностью ложной тревоги: тренды, резкие скачки, приближение точек к контрольной границе или оси абсцисс и др. Еще один подход – использование предупреждающей границы: попадание нескольких точек подряд между предупреждающей и контрольной границами свидетельствует о нарушении процесса. Обычная карта Хотеллинга (рис. 2) может быть построена в системе Statistica. Для построения этой карты с автоматическим обнаружением специальных структур, а также с предупреждающей границей используют специальное программное обеспечение.

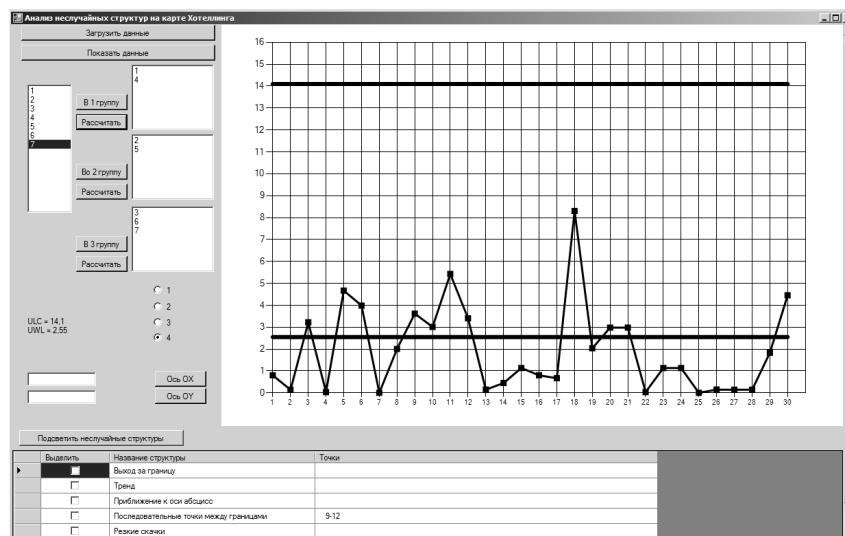


Рис. 2 – Карта Хотеллинга с предупреждающей границей о нарушении процесса свидетельствует о расположении четырех точек 9–12 подряд между границами

Fig. 2 – Hotelling's chart with warning: regarding the violation of the process indicates the location of the four points 9–12 in a row

2. Диагностика изменения рассеяния процесса

Наиболее распространенное изменение рассеяния процесса – это его скачкообразное или постепенное увеличение (рис. 3). При исследовании одного параметра, как правило, строят двойную карту Шухарта для одновременного контроля как изменений среднего уровня процесса, так и рассеяния (карты размахов или стандартных отклонений).

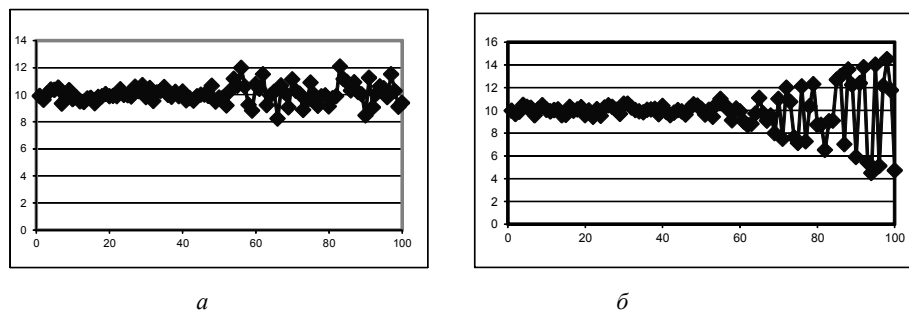


Рис. 3 – Моделирование возможных изменений рассеяния процесса:

а – скачкообразное увеличение рассеяния; б – тренд рассеяния

Fig. 3 – Modeling of possible changes in the scattering process:

а – scattering increases by leaps and б – trend of dispersion

Основной характеристикой многомерного рассеяния (при контроле многопараметрического процесса) является обобщенная дисперсия – определитель ковариационной матрицы [10–13]. Однако эффективность карты обобщенной дисперсии часто оказывается недостаточной для диагностики нарушений. Для повышения эффективности могут быть использованы те же подходы, что и для карт Шухарта и Хотеллинга: применение алгоритмов кумулятивных сумм или

экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии, а также предупреждающей границы или поиск структур специального вида.

В качестве примера на рис. 4 показана карта экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии: процесс стабилен, так как нет точек, выходящих за контрольные границы.

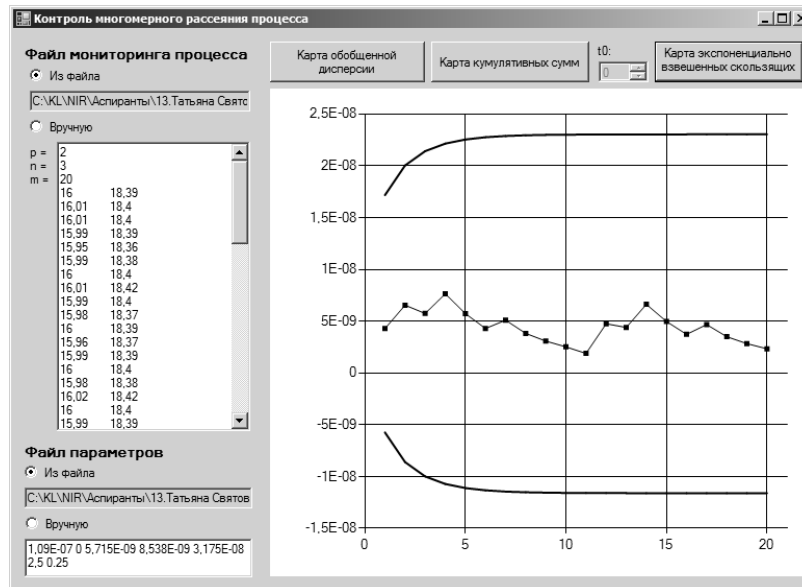


Рис. 4 – Карта экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии

Fig. 4 – Chart of exponentially weighted moving averages for generalized variance

3. Оценка эффективности алгоритмов диагностики нарушений процесса

Как уже отмечалось, при обнаружении различных видов нарушений стабильности работы агрегата разные алгоритмы диагностики этих нарушений имеют разную эффективность. Эффективность алгоритма определяет его чувствительность к изменению статистических свойств контролируемых характеристик. Для оценки чувствительности алгоритма применяют специальную функцию, называемую средней длиной серий. Она показывает, как быстро обнаружены нарушения, и численно равна среднему количеству наблюдений от момента нарушения процесса до момента обнаружения этого нарушения. Для карт Шухарта зависимость количества выборок от величины смещения процесса вычисляют аналитически. При использовании алгоритмов многомерного контроля аналитический расчет возможен для обычной карты Хотеллинга, карты обобщенной дисперсии и карт с предупреждающими границами [7, 12]. При использовании алгоритмов кумулятивных сумм, экспоненциально взвешенных скользящих средних, а также алгоритма поиска структур специального вида необходимы статистические испытания [14–15].

Для проведения таких исследований моделируют множество последовательностей векторов данных на основе многомерного нормального распределения с заданным вектором средних и ковариационной матрицей, а также задают различные виды нарушений. Возможные нарушения стабильности работы исследуемого агрегата целесообразно анализировать с участием экспертов. С целью обнаружения смоделированных нарушений применяют все предполагаемые к использованию разновидности алгоритмов и опытным путем оценивают среднюю длину серий.

На рис. 5 представлены в качестве примера кривые зависимости средней длины серий от смещения среднего уровня процесса при контроле трех параметров, нарушение процесса – постоянное смещение среднего уровня: 1 – обычная карта Хотеллинга; 2 – карта с предупреждающей границей; 3 – учет структур специального вида на карте Хотеллинга; первые две кривые построены аналитически, третья – по экспериментальным точкам результатов статистических исследований.

Из рисунка видно, что, например, при смещении среднего уровня процесса, соответствующего значению параметра нецентральности, равного 1,5 (отложен по горизонтальной оси), требуется не менее 13 наблюдений.

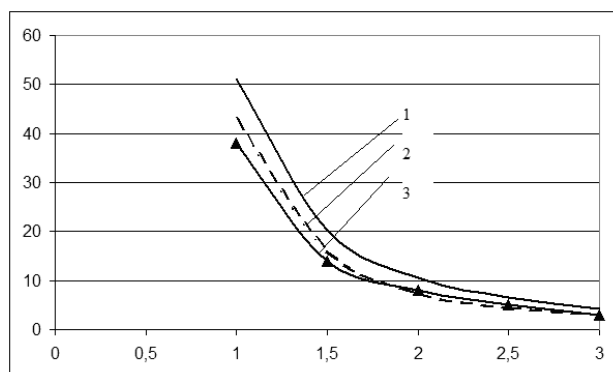


Рис. 5 – Зависимость средней длины серий от параметра нецентральности

Fig. 5 – The dependence of the average length of the series noncentrality

4. Предлагаемая методика оценки стабильности работы агрегата

Проведенное исследование позволяет предложить следующую методику оценки стабильности работы агрегата.

1. Изучают условия работы аналогичных агрегатов и выявляют возможные нарушения при его эксплуатации.
2. В условиях отлаженной (стабильной) работы агрегата снимают показания соответствующих датчиков и рассчитывают основные статистические характеристики: вектора средних значений и ковариационной матрицы (характеристики обучающей выборки).
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. Рассчитывают среднюю длину серий для различных статистических инструментов с учетом возможных нарушений.
5. Моделируют выборки, идентичные обучающей, и проводят статистические исследования для оценки средней длины серий тех инструментов, для которых аналитический расчет невозможен.
6. Отбирают инструменты с минимальной длиной серий по результатам аналитического расчета и исследований.
7. Проводят постоянный мониторинг работы агрегата с целью диагностики нарушений стабильности.

Заключение

Предложенная методика диагностирования нарушений стабильности функционирования технического агрегата на основе методов статистического контроля процессов позволяет своевременно выявлять возможные нарушения работы объекта и, при необходимости, предотвратить аварийные ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. – М.: Наука, 1983. – 200 с.
2. Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Алешина А.А. Моделирование вибраций гидроагрегата на основе адаптивных динамических регрессий // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 1. – С. 30–34.
3. Уиллер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта: пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с.
4. Клячкин В.Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии. – М.: Финансы и статистика: ИНФРА-М, 2009. – 304 с.
5. Montgomery D.C. Introduction to statistical quality control. – New York: John Wiley and Sons, 2009. – 754 p.
6. Ryan T.P. Statistical methods for quality improvement. – New York: John Wiley and Sons, 2011. – 687 p.
7. Клячкин В.Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. – М.: Физматлит, 2011. – 196 с.
8. Кравцов Ю.А. Анализ нарушений технологического процесса с помощью контрольной карты Хотеллинга // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2014. – № 1. – С. 51–54.
9. Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А. Многомерный статистический контроль процесса очистки питьевой воды // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации, 2015. – № 1 (26). – С. 31–40.
10. Клячкин В.Н. Многомерный статистический контроль рассеивания показателей технологического процесса // Известия вузов. Машиностроение. – 2002. – № 6. – С. 45–51.
11. Клячкин В.Н., Святова Т.И. Статистический контроль технологического рассеивания в многопараметрическом процессе // Автоматизация и современные технологии. – 2013. – № 12. – С. 22–25.
12. Святова Т.И., Клячкин В.Н. Алгоритм экспоненциально взвешенных скользящих средних для многомерного статистического контроля рассеивания процесса // Радиотехника. – 2015. – № 6. – С. 42–44.
13. Клячкин В.Н., Святова Т.И. Методы статистического контроля технологического процесса по критерию многомерного рассеивания // Радиопромышленность. – 2015. – № 4. – С. 147–153.
14. Бубыр Д.С., Клячкин В.Н., Карпунина И.Н. Использование бинарных переменных при регрессионном моделировании состояния технического объекта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 6-2. – С. 371–373.
15. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. – М.: Наука, 1982. – 296 с.

THE USE OF STATISTICAL CONTROL METHODS FOR DEVICE OPERATION STABILITY ASSESSMENT

Klyachkin V.N.¹, Karpunina I.N.²

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

²Ulyanovsk Institute of Civil Aviation, Ulyanovsk, Russia

A technique of device operation stability assessment by taking readings of distributed sensor network was suggested based on the choice of the most sensitive to possible disturbances statistical control methods which are defined by calculation results as well as by statistical tests.

Device efficiency is defined by the stability of its functioning. Stability disturbance can lead to device operation termination or to emergency, so it is important to discover such disturbances as quickly as possible.

For example, device vibrations can be controlled by a distributed sensor network.

It is necessary to diagnose stability disturbance of the controlled object by these sensor readings. Disturbances come out as statistical characteristics changes, so to discover them statistical control methods and algorithms of technological processes can be used.

The technique of device operation stability assessment is suggested. It includes studying similar device operation conditions and detecting possible disturbances; taking sensor readings under stable operation conditions and calculating the main statistical characteristics such as vectors of average values and the covariance matrix (learning sample characteristics); choosing possible statistical instruments for the following control; calculating an average series length for different statistical instruments considering possible disturbances; conducting statistical tests; selecting instruments with a minimal series length; continuous monitoring of device operation to diagnose stability disturbances.

Keywords: Shewhard chart; multivariate Hotelling chart; generalized variance; average run length.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-65-72

REFERENCES

1. Nikiforov I.V. *Posledovatel'noe obnaruzhenie izmeneniya svoystv vremennykh ryadov* [Consecutive properties change revealing of temporal series]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 200 p.
2. Klyachkin V.N., Kuvaikova Yu.E., Aleshina A.A. Modelirovanie vibratsii gidroagregata na osnove adaptivnykh dinamicheskikh regressii [Hydroelectric generator vibration modelling on basis of adoptive dynamical regressions]. *Avtomatizatsiya i so-vremennye tekhnologii – Automation and Modern Technologies*, 2014, no. 1, pp. 30–34.
3. Wheeler D.J., Chambers D.S. *Understanding statistical process control*. 2nd ed. Knoxville, Tenn., SPC Press, 1992. 406 p. (Russ. ed.: Uiller D., Chambers D. *Statisticheskoe upravlenie protsessami: optimizatsiya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta*. Translated from English. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2009. 409 p.).
4. Klyachkin V.N. *Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom: komp'yuternye tekhnologii* [Statistical methods in quality control: information technologies]. Moscow, Finansy i statistika Publ., INFRA-M Publ., 2009. 304 p.
5. Montgomery D.C. *Introduction to statistical quality control*. New York, John Wiley and Sons, 2009. 754 p.
6. Ryan T.P. *Statistical methods for quality improvement*. New York, John Wiley and Sons, 2011. 687 p.
7. Klyachkin V.N. *Modeli i metody statisticheskogo kontrolya mnogoparametricheskogo tekhnologicheskogo protsessa* [Statistical control models and methods of multi parameter technological process]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 196 p.
8. Kravtsov Yu.A. Analiz narushenii tekhnologicheskogo protsessa s pomoshch'yu kontrol'noi karty Khotellinga [Disturbance analysis of technological process by using Hotelling control chart]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 1, pp. 51–54.
9. Klyachkin V.N., Kravtsov Yu.A. Mnogomernyi statisticheskii kontrol' protsessa ochestki pit'evoi vody [Multivariate statistical control of the potable water treatment process]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 1 (26), pp. 31–40.
10. Klyachkin V.N. Mnogomernyi statisticheskii kontrol' rasseivaniya pokazatelei tekhnologicheskogo protsessa [Multidimensional statistical control of technological process indexes dispersion]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2002, no. 6, pp. 45–51.
11. Klyachkin V.N., Svyatova T.I. Statisticheskii kontrol' tekhnologicheskogo rasseyaniya v mnogoparametricheskom protsesse [Statistical control of technological dispersion in multi parameter process]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii – Automation and Modern Technologies*, 2013, no. 12, pp. 22–25.

12. Svyatova T.I., Klyachkin V.N. Algoritm eksponentsial'no vzveshennykh skol'zyashchikh srednikh dlya mnogomernogo statisticheskogo kontrolya rasseyaniya protsessa [Algorithm of exponentially weighted moving averages control chart for multivariate statistical control of process dispersion]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2015, no. 6, pp. 42–44.
13. Klyachkin V.N., Svyatova T.I. Metody statisticheskogo kontrolya tekhnologicheskogo protsessa po kriteriyu mnogomernogo rasseyaniya [Methods of statistical control of technological process by multidimensional dispersion criteria]. *Radiopromyshlennost' – Radio industry*, 2015, no. 4, pp. 147–153.
14. Buby'r' D.S., Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Ispol'zovanie binarnykh peremennykh pri regressionnom modelirovanii sostoyaniya tekhnicheskogo ob"ekta [Use of binary variables in the regression modeling of the technical object state]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 6-2, pp. 371–373.
15. Ermakov S.M., Mikhailov G.A. *Statisticheskoe modelirovanie* [Statistical modeling]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 296 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Клячкин Владимир Николаевич – родился в 1950 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Ульяновского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование, статистические методы, контроль качества, техническая диагностика. Опубликовано 165 научных работ. (Адрес: 432027, Россия, г. Ульяновск, улица Северный Венец, дом 32. Email: v_kl@mail.ru).

Klyachkin Vladimir Nikolaevich (b. 1950) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, professor of the Applied Mathematics and Informatics Department in the Ulyanovsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling, statistical methods, quality control, and technical diagnostics. He is the author of 165 scientific papers. (Address: 32, Severniy Venets St., Ulyanovsk, 432027, Russia. Email: v_kl@mail.ru).



Карпунина Ирина Николаевна – родилась в 1953 году, канд. техн. наук, доцент кафедры «Общепрофессиональные дисциплины» Ульяновского института гражданской авиации имени главного маршала авиации Б.П. Бугаева. Область научных интересов: динамика и прочность машин, надежность. Опубликовано 50 научных работ. (Адрес: 432071, Ульяновск, ул. Верхнеполевая, 23).

Karpunina Irina Nikolaevna (b. 1953) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, department of general disciplines «Ulyanovsk Institute of Civil Aviation». Her research interests include dynamics and strength of machines and reliability. She is the author of 50 scientific papers. (Address: 23, Verhnepolevaya St., Ulyanovsk, 432071, Russia. Email: karpunina53@yandex.ru).

Статья поступила 14 марта 2016 г.

Received March 14, 2016

To Reference:

Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Ispol'zovanie metodov statisticheskogo kontrolya dlya otsenki stabil'nosti raboty agregatov [The usage of statistical control methods for stability assessment of device operation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 65–72. doi:10.17212/1727-2769-2016-3-65-72