

УДК 519.248

В.Н. Клячкин, И.Н. Карпунина, М.К. Федорова

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА КОМПЬЮТЕРА¹

Клячкин Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, окончил механический факультет Ульяновского политехнического института. В настоящее время профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Ульяновского государственного технического университета. Имеет научные труды в области надежности и статистических методов. [e-mail: v_kl@mail.ru].

Карпунина Ирина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, окончила Московский авиационный институт, доцент кафедры «Общепрофессиональные дисциплины» Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева. Область научных интересов: динамика и прочность машин, надежность. [e-mail: karpunina53@yandex.ru].

Федорова Мария Константиновна, окончила факультет информационных систем и технологий УлГТУ. Область научных интересов: компьютерные технологии статистического анализа данных. [e-mail: mashulka3031_94@mail.ru].

Аннотация

Температурный режим существенно влияет на долговечность компьютера. Обеспечение надежности функционирования компьютера предполагает стабильный уровень температуры нагрева основных компонентов, не превышающий заданных значений. В статье рассматриваются вопросы, связанные со своевременным предупреждением о возможном нарушении стабильности температурного режима. Для диагностики стабильности предлагается использовать методы многомерного статистического контроля. Оценка стабильности режима проводится по двум критериям – по стабильности среднего уровня температур и их рассеяния. Независимые параметры могут контролироваться с помощью стандартных карт Шухарта. Для коррелированных параметров используются алгоритмы, основанные на статистике Хотеллинга (для оценки стабильности среднего уровня процесса изменения температур) и обобщенной дисперсии (для оценки стабильности рассеяния процесса). Эффективность этих алгоритмов может быть повышена путем анализа неслучайных структур на контрольных картах, использования предупреждающей границы, а также применения модификаций на базе кумулятивных сумм или экспоненциально взвешенных скользящих средних. В настоящей статье предложена методика многомерного статистического контроля температурного режима компьютера, включающая проведение контроля в условиях отлаженного процесса по обучающей выборке с целью разделения контролируемых параметров на группы независимых и коррелированных, анализ процесса для оценки характеристик контроля и постоянный мониторинг процесса с построением карт Хотеллинга и обобщенной дисперсии с выявлением возможных нарушений процесса на основе наличия неслучайных структур и использования предупреждающей границы. Эта методика проиллюстрирована на примере контроля пяти параметров температурного режима компьютера.

Ключевые слова: стабильность, температурный режим, алгоритм Хотеллинга, предупреждающая граница, обобщенная дисперсия, контрольная карта.

EVALUATION OF THE COMPUTER TEMPERATURE REGIME STABILITY

Vladimir Nikolaevich Kliachkin, Doctor of Engineering; graduated from the Mechanical Faculty of Ulyanovsk Polytechnic Institute; Professor at the Department of Applied Mathematics and Informatics of Ulyanovsk Polytechnic University; an author of scientific works in the field of reliability and statistical methods. e-mail: v_kl@mail.ru.

Irina Nikolaevna Karpunina, Candidate of Engineering, Associate Professor; graduated from Moscow Aviation Institute; Associate Professor at the Department of General Professional Disciplines at Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation B.P. Bugaev; interested in dynamics and strength of machines, reliability. e-mail: karpunina53@yandex.ru.

Mariia Konstantinovna Fedorova, graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies of Ulyanovsk State Technical University; interested in computer-aided technologies of statistical data analysis. e-mail: mashulka3031_94@mail.ru.

¹ Исследование выполнено в рамках государственного задания №2014/232 на выполнение работ в сфере научной деятельности Минобрнауки России и при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-48-02038.

Abstract

The temperature regime significantly affects the durability of the computer. Ensuring stability of the computer functioning considers the stability of the heating temperature of the main elements that should not exceed the specified values. The article discusses issues related to the timely warning about a possible violation of the temperature regime stability. In order to diagnose stability, the multivariate statistical control methods are proposed to use. Evaluation of stability is carried out with the use of two criteria: stability of the temperature average level and their dispersion. Independent parameters can be controlled with the use of standard Shewhart charts. The algorithms on the basis of Hotelling statistics (for assessing stability of the middle-level temperature measurement process) and generalized variance (for evaluation of the dispersion process stability) are used for correlated parameters. The efficiency of these algorithms can be enhanced through the analysis of non-random structures on the control charts, the use of the warning border, as well as application of modifications based on the cumulative amounts or moving averages weighted exponentially. The multivariate statistical technique of the computer temperature regime control including monitoring in the context of a well-developed process for a training sample in order to separate the parameters controlled for a group of independent and correlated ones, process analysis for assessment of control characteristics and continuous monitoring of the process with the construction of Hotelling charts and generalized dispersion with identifying possible violations of the process based on the presence of significant structures and the use of a warning border. This technique is illustrated by the example of five computer temperature regime parameters control.

Key words: stability, temperature, Hotelling algorithm, warning limit, generalized variance, control chart.

ВВЕДЕНИЕ

Температурный режим существенно влияет на долговечность компьютера. При перегреве компьютер может самопроизвольно перезагружаться, наблюдается значительное снижение производительности, происходит закрытие программ, изображения на экране отображаются недостаточно четко.

При осуществлении операций, не требующих значительных ресурсов компьютера, например, при работе с текстовым редактором, значение температуры центрального процессора от 30 до 45°C считается нормальным. Температуру в 60–65°C принято считать неблагоприятной. В таком режиме работы возможны частые сбои. Температура 70–85°C является критической. Температура ядер при минимальной загрузке составляет от 20 до 45°C. Нормальная температура ядра при обычной работе составляет не выше 70–75°C.

При мониторинге температурного режима графического процессора следует учитывать, что для современ-

ных видеокарт значение в 60–65°C является нормой. Мощные видеоадаптеры дополнительно оснащаются системой охлаждения. Для каждой видеокарты существует своя критическая температура и температура нормальной стабильной работы. Нормальная температура видеокарты стационарного компьютера около 55–65°C, в ноутбуке на 10–20°C выше. Критические температуры начинаются от 70–75°C, в зависимости от производителя самой видеокарты.

Измерить температуру различных компонентов компьютера и предупредить возникновение различных неполадок можно, воспользовавшись специальными программами [1]. Эти программы дают возможность обнаружить фактическое превышение допустимых уровней температуры.

Гораздо больший интерес представляют методы, позволяющие заранее предсказать возможное изменение процесса работы компьютера, связанное с увеличением температур. Статистические методы контроля процессов

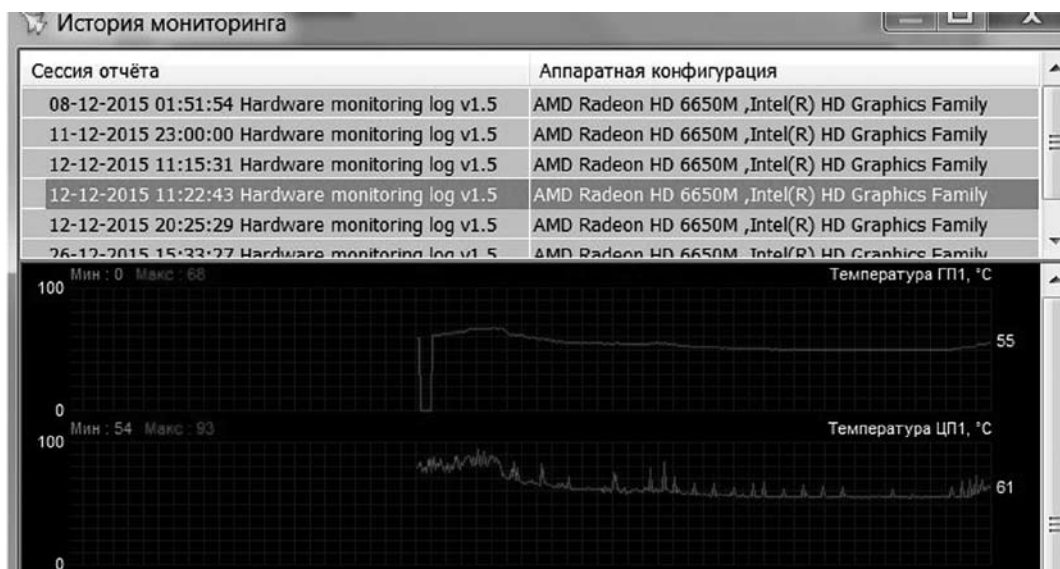


Рис. 1. Окно мониторинга температуры

предоставляют такую возможность: выход определенных статистик за границы соответствующих доверительных интервалов свидетельствуют о нарушении стабильности процесса. Процесс считается стабильным, если распределение контролируемых показателей остается постоянным (происходящие изменения распределения незначимы) [2–4]. Таким образом, статистически нарушение стабильности процесса состоит в изменении распределения контролируемого параметра (как правило, может измениться средний уровень температуры или ее рассеяние). При этом фактически превышения критических значений пока нет (например, статистическими методами обнаруживается увеличение рассеяния процесса изменения температуры: характеристика рассеяния выходит за границы доверительного интервала, это свидетельствует о необходимости регулировки процесса для того, чтобы не произошло нарушение режима работы компьютера: выхода температуры за критическое значение).

Ограничимся исследованием стабильности процесса по пяти факторам: температурам центрального процессора, двух ядер, графического видеопроцессора и видеокарты. Таким образом, рассматривается многомерный процесс изменения температур компонентов компьютера во времени.

Для мониторинга температур были использованы различные утилиты [1]. На рисунке 1 в качестве примера показан график температур центрального процессора: показания снимались каждые 10 секунд. Эти данные предварительно обрабатывались с целью исследования корреляций между температурами нагрева различных компонентов. По степени коррелированности данные были разделены на две группы. В первую вошли данные по коррелированным между собой температурам графического процессора, видеокарты и центрального процессора. Во вторую группу вошли значения температур ядер, между которыми также имеет место значимая корреляция. Корреляции между группами оказались незначимыми.

Наиболее распространенным инструментом статистического контроля независимых параметров процесса являются карты Шухарта [4, 5]. На карте изображаются точки, показывающие изменение соответствующих статистик с течением времени, и контрольные границы, соответствующие границам доверительных интервалов. Выход точки за контрольную границу свидетельствует о нарушении процесса работы компьютера (изменилось распределение контролируемого показателя), хотя при этом соответствующий показатель еще не вышел за границы допуска. Как правило, используются двойные карты – одновременно проверяются две нулевые гипотезы: о равенстве средних заданному значению и о равенстве дисперсии некоторому номинальному значению. Для контроля стабильности среднего уровня процесса применяются карты средних, медиан, индивидуальных наблюдений, для контроля его рассеяния – карты размахов, стандартных отклонений, дисперсий. Эти инструменты применяются к самым разнообразным процессам: в машиностроении, металлургии, радиотехнике, экологии и т. д. [6–10].

При многомерном контроле процесса, в котором состояние объекта определяется несколькими коррелированными параметрами, также могут быть использованы различные статистические инструменты [4, 5, 10–12]. Наиболее распространенным из них является карта Хотеллинга, основное назначение которой – мониторинг изменения среднего уровня многопараметрического процесса, то есть проверка нулевой гипотезы о равенстве вектора средних заданному вектору. Для контроля многомерного рассеяния, то есть для проверки нулевой гипотезы о равенстве ковариационной матрицы процесса некоторой заданной матрице, предложено несколько алгоритмов на базе обобщенной дисперсии [5, 11, 12].

Эффективность контроля оценивается по его чувствительности к возможным нарушениям процесса. Основной характеристикой чувствительности является средняя длина серий – количество наблюдений от момента нарушения процесса до момента обнаружения этого нарушения. Для повышения чувствительности используются различные подходы: анализ структур специального вида на карте, применение предупреждающей границы, модификации карт на основе алгоритмов кумулятивных сумм и экспоненциально взвешенных скользящих средних и другие [13, 14].

1 АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ СРЕДНЕГО УРОВНЯ ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИКИ ХОТЕЛЛИНГА

Алгоритм Хотеллинга для проверки гипотезы о равенстве вектора средних заданному вектору предполагает расчет для каждой t -й мгновенной выборки ($t = 1, \dots, m$) статистики Хотеллинга:

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

где n – объем мгновенной выборки;

\bar{X}_t – вектор средних в мгновенных выборках,

$\bar{X}_t = (\bar{x}_{t1} \dots \bar{x}_{tp})^T$, \bar{x}_{ij} – среднее значение в t -й мгновенной выборке по j -му параметру ($j = 1, \dots, p$);

μ_0 – вектор средних, $\mu_0 = (\mu_1, \dots, \mu_p)^T$,

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

(x_{ijt} – результат i -го наблюдения за j -м параметром в t -й мгновенной выборке).

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

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

При стабильном ходе процесса должно выполняться условие $T_t^2 < T_{kp}^2$, где T_{kp}^2 – граница критической области (доверительного интервала). При оценивании компонент ковариационной матрицы с использованием текущих

мгновенных выборок по формуле (3) граница критической области определяется по формуле:

$$T_{kp}^2 = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{1-\alpha}(p, mn-m-p+1), \quad (4)$$

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

Основной критерий нарушения стабильности процесса – выход статистики Хотеллинга (1) за контрольную границу (4). 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. При этом под трендом понимается наличие заданного количества точек только на возрастание или, наоборот, на убывание. Приближение к оси абсцисс – это расположение точек в нижней трети диапазона между этой осью и контрольной границей, а приближение к контрольной границе, напротив, – в верхней трети. Анализируются также резкие скачки. Под цикличностью понимается расположение определенного количества точек в шахматном порядке: то выше, то ниже. Расчет количества точек в таких структурах основан на расчете вероятности ее появления: если эта вероятность

соизмерима с уровнем значимости, то структура из-за данного числа точек должна рассматриваться как случайная, т. е. свидетельствующая о возможном нарушении стабильности процесса [15].

Эффективность алгоритма контроля также может быть повышена путем использования, наряду с контрольной границей UCL (Upper Control Limit), предупреждающей границы UWL (Upper Warning Limit). Расположение нескольких точек подряд (от двух до четырех) в зоне между предупреждающей и контрольной границами также может быть свидетельством нестабильности процесса.

2 АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ РАССЕЙНИЯ ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ ДИСПЕРСИИ

Контроль многомерного рассеяния процесса сводится к проверке гипотезы о равенстве ковариационной матрицы процесса \sum заданной матрице \sum_0 . В качестве критерия для проверки этой гипотезы предложено использовать обобщенную дисперсию [5, 11] – определитель ковариационной матрицы S_t , компоненты которой определяются по формулам (3), $|S_t|$ есть обобщенная дисперсия t -й мгновенной выборки.

Также вычисляются оценки средней ковариации по всей совокупности наблюдений

$$\bar{s}_{jk} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m s_{jkt}, \quad (5)$$

которые образуют ковариационную матрицу S ; ее определитель $|S|$ используется в качестве оценки целевой обобщенной дисперсии $|\sum_0|$.

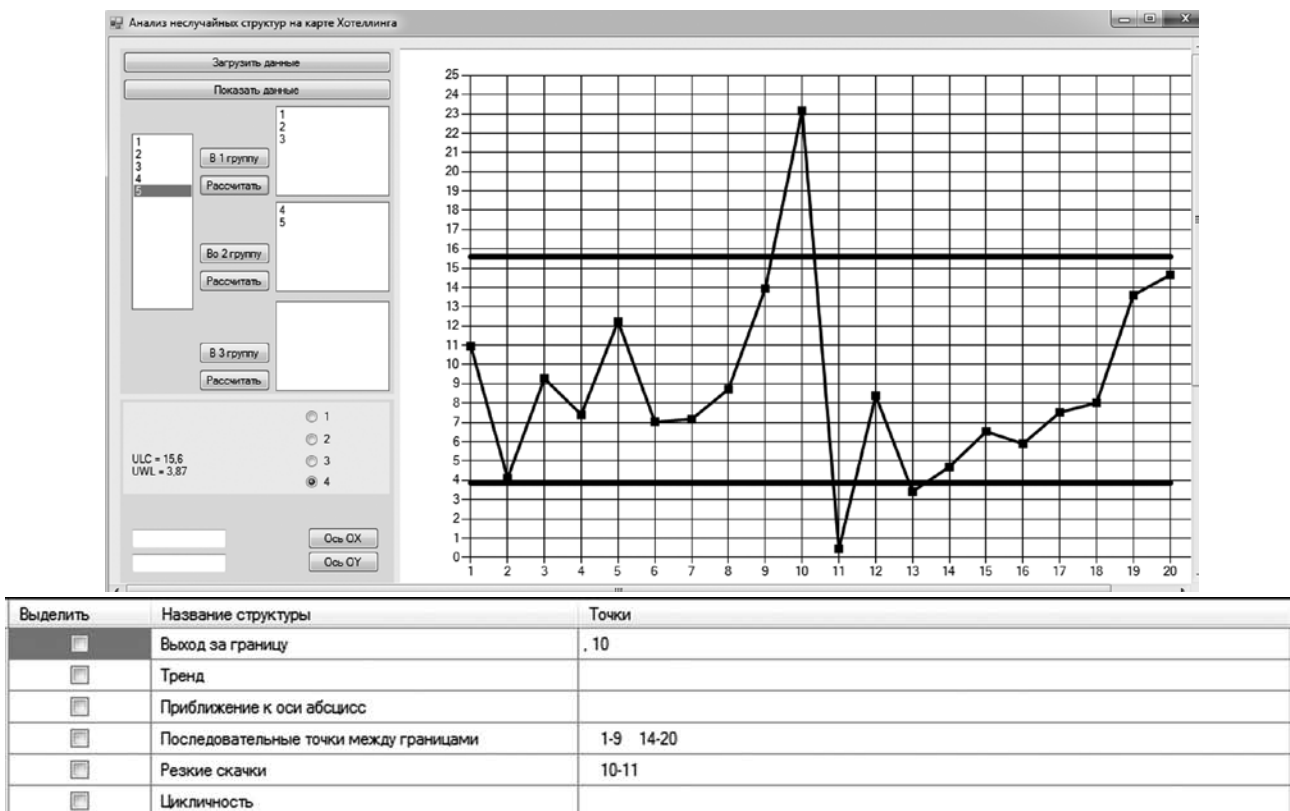


Рис. 2. Мониторинг процесса с помощью карты с предупреждающей границей

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

$$m_{|s|} \pm u_{1-\alpha/2} \sigma_{|s|} \quad (6)$$

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 $\sigma_{|s|} = \sqrt{b_2} |\Sigma_0|$;

$$b_1 = \frac{1}{(n-1)^p} \prod_{j=1}^p (n-j); \quad (7)$$

$$b_2 = \frac{1}{(n-1)^{2p}} \prod_{j=1}^p (n-j) \times \left[\prod_{k=1}^p (n-k+2) - \prod_{k=1}^p (n-k) \right], \quad (8)$$

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

$$\left. \begin{matrix} UCL \\ LCL \end{matrix} \right\} = |\Sigma_0| (b_1 \pm u_{1-\alpha/2} \sqrt{b_2}). \quad (9)$$

Эффективность алгоритма обобщенной дисперсии, как и алгоритма Хотеллинга, может быть повышена за счет учета неслучайных структур на соответствующей карте, применения предупреждающей границы, а также путем модификации карты на основе использования кумулятивных сумм и экспоненциально взвешенных скользящих средних [12].

3 МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

До проведения мониторинга температурного режима проводился анализ процесса по обучающей выборке, полученной в период стабильной работы компьютера. Эта выборка применяется для оценки параметров используемых алгоритмов контроля, в частности, положения контрольных и предупреждающих границ на картах.

При мониторинге процесса для выявления нарушений стабильности использовалась как обычная карта Хотеллинга, на которой проводился поиск структур специального вида (появление таких структур – свидетельство нарушения процесса), так и многомерная карта с предупреждающей границей. Появление нескольких точек подряд между контрольной и предупреждающей границами свидетельствует о нарушении процесса, количество точек определяется положением границ. На

рисунке 2 показана такая карта с множеством различных нарушений для первой группы параметров (температуры графического процессора, видеокарты и центрального процессора): выход точки 10 за контрольную границу, две последовательности более, чем из четырех точек (1–9 и 14–20) расположены между предупреждающей и контрольной границами, наличие резкого скачка между 10-й и 11-й точками.

Карта обобщенной дисперсии $|S_t|$ для этой же группы параметров показана на рисунке 3: нарушений рассеяния нет. Такой же результат показала и карта экспоненциально взвешенных скользящих средних $E_{|S_t|}$, построенная для второй группы параметров (температуры двух ядер): эта карта имеет криволинейные границы, основной признак нарушения процесса – выход точки за такую границу; из рисунка 4 видно, что нарушений по рассеянию не обнаружено.

Таким образом, мониторинг стабильности температурного режима по первой группе показателей с использованием предлагаемой методики позволил выявить нарушение стабильности по среднему уровню температур уже в 4-м наблюдении: об этом свидетельствует последовательность из первых четырех точек, расположенных между

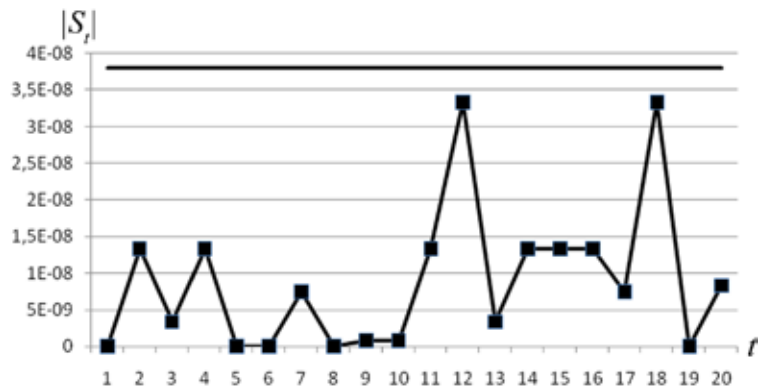


Рис. 3. Карта обобщенной дисперсии по первой группе параметров

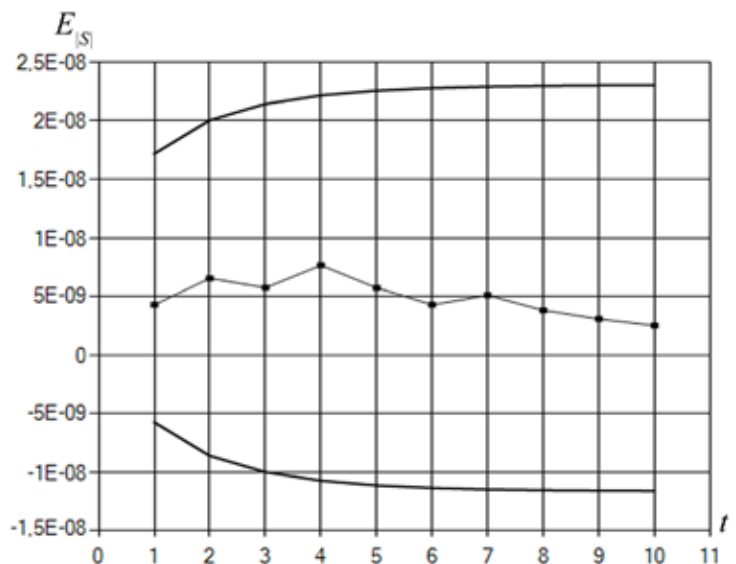


Рис. 4. Карта экспоненциально взвешенных скользящих средних обобщенной дисперсии по второй группе параметров

предупреждающей и контрольной границами на карте Хотеллинга (рис. 2). При этом выход за границу допуска пока не произошел, есть возможность отрегулировать процесс, обеспечив его стабильность (например, снизив нагрузку на процессор). Нарушений стабильности по рассеянию не обнаружено. Мониторинг второй группы показателей (температуры ядер) нарушений не выявил.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования предлагается следующая методика многомерного статистического контроля температурного режима.

1. Проведение статистического контроля в условиях отлаженного процесса (по обучающей выборке), исследование корреляционной матрицы и разделение контролируемых параметров на группы независимых и коррелированных.

2. Анализ процесса с целью установления параметров многомерного контроля по алгоритму Хотеллинга (ковариационная матрица и контрольные границы) и по алгоритму обобщенной дисперсии (целевая ковариационная матрица и контрольные границы).

3. Постоянный мониторинг процесса с построением карт Хотеллинга и обобщенной дисперсии на основе параметров, установленных при анализе процесса, с выявлением возможных нарушений стабильности процесса на основе наличия неслучайных структур и использования предупреждающей границы.

Результаты исследования показывают, что при анализе стабильности температурного режима компьютера могут быть использованы различные статистические инструменты многомерного контроля. Для контроля среднего уровня температур эффективны алгоритмы, основанные на статистике Хотеллинга, и различные их модификации, обеспечивающие повышение чувствительности к обнаружению нарушений процесса [15]. Для контроля многомерного рассеяния температур использованы алгоритмы на основе обобщенной дисперсии. Приведенный пример показывает, что применение предлагаемой методики приводит к более быстрому обнаружению нарушения стабильности температурного режима компьютера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Как узнать температуру процессора. – URL: <http://smartronix.ru/normalnaya-temperatura-processora> (дата обращения: 05.06.2016).
2. Бродский Б.Е., Дарховский Б.С. Проблемы и методы вероятностной диагностики // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 8. С. 3–50.
3. Дарховский Б.С. О двух задачах оценивания моментов изменения вероятностных характеристик случайной последовательности // Теория вероятностей и ее применения. – 1984. – Т. 29. – С. 464–473.
4. Уиллер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта: пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс. – 2009. – 409 с.

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

6. Клячкин В.Н. Многомерный статистический контроль рассеивания показателей качества технологического процесса // Известия вузов. Машиностроение. – 2002. – № 6. – С. 45–51.

7. Клячкин В.Н., Бубырь Д.С. Прогнозирование состояния технического объекта на основе кусочно-линейных регрессий // Радиотехника. – 2014. – № 7. – С. 137–140.

8. Клячкин В.Н., Бубырь Д.С., Карпунина И.Н. Использование бинарных переменных при регрессионном моделировании состояния технического объекта // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – № 6(2), Т. 16. – С. 357–359.

9. Клячкин В.Н. Оценка стабильности состояния окружающей среды с помощью контрольных карт // Экологические системы и приборы. – 2011. – № 2. – С. 19–21.

10. Клячкин В.Н. Структура системы для статистического контроля многопараметрического технологического процесса // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 6. – С. 50–51.

11. Aparisi F., Jabaloyes J., Carrion A. Statistical properties of the |S| multivariate control chart // Comm.in Statistics – Theory and Methods. – 1999. – V. 28. – № 11. – pp. 2671–2686.

12. Клячкин В.Н., Святова Т.И. Статистический контроль рассеяния в многопараметрическом процессе // Автоматизация. Современные технологии. – 2013. – № 12. – С. 22–25.

13. Lowry C.A., Woodal W.H., Champ C.W., Rigdon S.E. A multivariate exponentially weighted moving average control chart // Technometrics. – 1992. – V. 34. – pp. 46–53.

14. Lowry C.A., Montgomery D.C. A review of multivariate control charts // IIE transactions. – 1995. – V. 27. – pp. 800–810.

15. Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А., Жуков Д.А. Оценка эффективности диагностики состояния объекта по наличию неслучайных структур на карте Хотеллинга // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 1(39). – С. 50–56.

REFERENCES

1. *Kak uznat temperaturu protsessora* [How to Spot a Processor Temperature]. Available at: <http://smartronix.ru/normalnaya-temperatura-processora> (accessed 05.06.2016).
2. Brodskii B.E., Darkhovskii B.S. Problemy i metody veroiatnostnoi diagnostiki [Challenges and Methods of Probabilistic Diagnostics]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1999, no. 8, pp. 3–50.
3. Darkhovskii B.S. O dvukh zadachakh otsenivaniia momentov izmeneniia veroiatnostnykh kharakteristik sluchainoi posledovatelnosti [On Two Estimation Problems of the Moment of a Change in Probabilistic Characteristics of a Random Sequence]. *Teoriia veroiatnostei i ee primeneniia* [Theory of Probability and its Applications], 1984, vol. 29, pp. 464–473.

4. Wheeler D., Chambers D. *Statisticheskoe upravlenie protsessami. Optimizatsiia biznesa s ispolzovaniem kontrolnykh kart Shukharta*. per. s angl. [Understanding Statistical Process], Moscow, Alpina Business Books Publ., 2009. 409 p.
5. Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*. New York, John Wiley and Sons Publ., 2009. 754 p.
6. Kliachkin V.N. Mnogomernyi statisticheskii kontrol rasseivaniia pokazatelei kachestva tekhnologicheskogo protsessa [Multivariate Statistical Control for Process Performance Dispersion]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Proc. of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2002, no. 6, pp. 45–51.
7. Kliachkin V.N., Bubyr D.S. Prognozirovaniie sostoianiia tekhnicheskogo obekta na osnove kusochno-lineinykh regressii [Forecasting of Technical Object State Based on Piecewise Linear Regression]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2014, no. 7, pp. 137–140.
8. Kliachkin V.N., Bubyr D.S., Karpunina I.N. Ispolzovanie binarnykh peremennykh pri regressionnom modelirovanii sostoianiia tekhnicheskogo obekta [The Use of Binary Variables in the Regression Modeling of the Technical Object State]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proc. of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2014, no. 6(2), vol. 16, pp. 357–359.
9. Kliachkin V.N. Otsenka stabilnosti sostoianiia okruzhaiushchei sredy s pomoshchiu kontrolnykh kart [Estimation of Stability of the Condition of Environment by Means of Control Charts]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], 2011, no. 2, pp. 19–21.
10. Kliachkin V.N. Struktura sistemy dlia statisticheskogo kontrolya mnogoparametricheskogo tekhnologicheskogo protsessa [The Structure of a System for Statistical Control of Multiparametric Processing]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems. Monitoring, Control, and Diagnostics], 2003, no. 6, pp. 50–51.
11. Aparisi F., Jabaloyes J., Carrion A. Statistical Properties of the |S| Multivariate Control Chart. *Comm. in Statistics. Theory and Methods*, 1999, vol. 28, no. 11, pp. 2671–2686.
12. Kliachkin V.N., Sviatova T.I. Statisticheskii kontrol rasseivaniia v mnogoparametricheskom protsesse [The Statistical Control of the Technological Dispersion in Polyvalent Process]. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii* [Automation and Modern Technologies], 2013, no. 12, pp. 22–25.
13. Lowry C.A., Woodal W.H., Champ C.W., Rigdon S.E. A Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart. *Technometrics*, 1992, vol. 34, pp. 46–53.
14. Lowry C.A., Montgomery D.C. A Review of Multivariate Control Charts. *IIE Transactions*, 1995, vol. 27, pp. 800–810.
15. Kliachkin V.N., Kravtsov Iu.A., Zhukov D.A. Otsenka effektivnosti diagnostiki sostoianiia obekta po nalichiiu nesluchainykh struktur na karte Khotellinga [Evaluation of Object Status Diagnosing Efficiency to Non-random Structures Existence on the Hotelling's Chart]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2015, no. 1, pp. 50–56.