

ИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ

© 2013 В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алешина, Ю.А. Кравцов

Ульяновский государственный технический университет

Поступила в редакцию 26.09.2013

Для предупреждения о возможности аварийной ситуации на техническом объекте по результатам контроля множества параметров его работы разработана информационно-математическая система, включающая блок прогнозирования состояния объекта по результатам решения системы временных рядов, а в условиях стабильной работы – блок оценки стабильности с помощью многомерных контрольных карт. Ключевые слова: аварийная ситуация, раннее обнаружение, информационно-математическая система, показания датчиков, система временных рядов, контрольная карта Хотеллинга

Проблема предупреждения чрезвычайных ситуаций на технических объектах связана с безопасным функционированием таких объектов. Весьма важным при этом является диагностика текущего состояния и прогнозирование состояния объекта с целью раннего предупреждения о возможности аварийной ситуации.

Оценка технического состояния объекта производится по результатам измерений некоторых параметров с помощью множества датчиков через определенные промежутки времени, которые, как правило, образуют систему взаимосвязанных временных рядов. Для этой системы может быть построена соответствующая математическая модель, позволяющая прогнозировать изменение ее характеристик и обнаруживать нарушение процесса до того, как контролируемые параметры вышли за предельные значения.

В настоящее время, как правило, несмотря на возможную коррелированность показаний датчиков, каждый временной ряд анализируется независимо от других, что приводит к существенным погрешностям при прогнозировании показаний.

В режиме стационарной работы объекта для оценки стабильности процесса могут быть использованы многомерные контрольные карты, аналогичные используемым при контроле многопараметрических технологических процессов.

Для предупреждения о возможности аварийной ситуации на техническом объекте по результатам контроля множества параметров его рабо-

Клячкин Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика». E-mail: v_kl@mail.ru

Кувайскова Юлия Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и информатика». E-mail: u.kuvaiskova@mail.ru

Алешина Анна Александровна, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика».

Кравцов Юрий Андреевич, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика».

ты разработана информационно-математическая система, включающая блок прогнозирования состояния объекта по результатам решения системы временных рядов, а в условиях стабильной работы – блок оценки стабильности с помощью многомерных контрольных карт.

Моделирование и прогнозирование системы временных рядов по показаниям датчиков основано на методике структурно-параметрической идентификации системы, реализованной на основе подхода адаптивного регрессионного моделирования [1 - 3], предусматривающего при построении моделей временных рядов последовательную адаптацию модели к возможным нарушениям основных предположений регрессионного анализа.

Рассмотрим технический объект, состояние которого характеризуется параметрами, значения которых регистрируются через определенные промежутки времени и образуют многомерный временной ряд, представляемый в виде системы $y^1(t), y^2(t), \dots, y^N(t)$. Предполагается, что одномерный временной ряд $y^i(t)$, наблюдаемый в равноотстоящие моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n , может быть представлен в виде суммы функций:

$$y^i(t) = f^i(t) + g^i(t) + \psi^i(t) + \varepsilon^i(t), \quad (1)$$

при этом функция $f^i(t)$ – неслучайная (долговременная) функция тренда соответствующего ряда; $g^i(t)$ – неслучайная периодическая функция – совместная гармоническая составляющая ряда; $\psi^i(t)$ – случайная с элементами регулярности функция – векторная авторегрессия; $\varepsilon^i(t)$ – нерегулярная компонента (случайная величина, ошибка).

На первом этапе для системы временных рядов выполняется разведочный анализ (фрактальный, мультифрактальный) для выявления степени регулярности каждого ряда системы. При выявлении заметной трендоустойчивости

для соответствующих рядов выделяется функция тренда $f(t)$, которую обычно приближают полиномом достаточно низкой степени. Оптимальная функция трендовой составляющей ищется по критерию минимума внешнего среднеквадратического отклонения.

Дальнейшее сглаживание временного ряда производится методами совместного гармонического анализа. Для каждого ряда методом пошаговой регрессии находят значимые гармоники. После выделения регулярных составляющих целью анализа системы временных рядов является моделирование остатков случайной с элементами регулярности функцией $\psi(t)$. Функция $\psi(t)$ для системы взаимосвязанных рядов может быть представлена в виде модели векторной авторегрессии. Иногда для оценки параметров модели (1) эффективно использование псевдоградиентного метода [4].

В итоге получаем для каждого из N временных рядов комплексную модель, содержащую регулярную составляющую (тренд, гармоники) и векторную авторегрессию. После структурно-параметрической идентификации системы проверяется соблюдение условий применения регрессионного анализа. Если основные предположения соблюдаются, построенные комплексные модели системы временных рядов могут быть использованы для прогнозирования, в противном случае проводится соответствующая процедура адаптации к нарушению данного предположения [1].

Методика структурно-параметрической идентификации реализована в виде блока программного комплекса, предназначенного для построения моделей системы взаимосвязанных временных рядов с последующим их использованием для прогнозирования состояния и обнаружения нарушений процесса до того, как контролируемые параметры вышли за предельные значения.

Ниже представлены комплексные модели системы временных рядов, полученные по результатам наблюдений восьми датчиков вибраций гидроагрегата в режиме запуска (использовано 76 наблюдений).

$$y_1(t) = 6,249 \cdot t + 4,477 \cdot \sin(2\pi / 84) + 40,006 \times \sin(2\pi / 42) + 0,950 \cdot y_1(t-1) - 0,016 \cdot y_2(t-1) + 0,058 \cdot y_7(t-1) - 0,108 \cdot y_8(t-1) + \varepsilon_1(t),$$

$$y_2(t) = 6,265 \cdot t + 4,477 \cdot \sin(2\pi / 84) + 440,006 \times \sin(2\pi / 42) - 0,010 \cdot y_1(t-1) + 0,938 \cdot y_2(t-1) + 0,066 \cdot y_7(t-1) - 0,061 \cdot y_8(t-1) + \varepsilon_2(t),$$

$$y_3(t) = 15,036 + 4,477 \cdot \sin(2\pi / 84) + 36,386 \times \sin(2\pi / 4,941) + \varepsilon_3(t),$$

$$y_4(t) = 4,477 \cdot \sin(2\pi / 84) + 440,006 \cdot \sin(2\pi / 42) + 0,966 \cdot y_4(t-1) + 0,406 \cdot y_5(t-1) + 0,003 \cdot y_7(t-1) - 0,534 \cdot y_8(t-1) + \varepsilon_4(t),$$

$$y_5(t) = 34,798 + 4,477 \cdot \sin(2\pi / 84) + 440,006 \times \sin(2\pi / 42) + 0,981 \cdot y_5(t-1) + 0,312 \cdot y_8(t-1) + \varepsilon_5(t),$$

$$y_6(t) = 1436,810 - 20,836 \cdot t + 4,477 \cdot \sin(2\pi / 84) + 440,006 \cdot \sin(2\pi / 42) + 0,976 \cdot y_6(t-1) - 0,321 \cdot y_8(t-1) + \varepsilon_6(t),$$

$$y_7(t) = -6,715 \cdot t + 4,477 \cdot \sin(2\pi / 84) + 440,006 \times \sin(2\pi / 42) + 0,179 \cdot y_4(t-1) + 1,782 \cdot y_5(t-1) + 0,835 \cdot y_7(t-1) + 2,270 \cdot y_8(t-1) + \varepsilon_7(t),$$

$$y_8(t) = 4,477 \cdot \sin(2\pi / 84) + 363,862 \cdot \sin(2\pi / 28) + 0,979 \cdot y_8(t-1) + \varepsilon_8(t).$$

Качество полученной модели позволяет прогнозировать состояние гидроагрегата на 7-8 наблюдений (10% от выборки наблюдений). На рис. 1,а показан смоделированный временной ряд для канала №1, а на рис. 1,б - соответствующий прогноз на 8 наблюдений. Сплошной линией показаны опытные данные, штриховой - расчетные.

В режиме стационарной работы агрегата состояние объекта часто считается аварийным, если нарушена стабильность процесса. При контроле технологических процессов общепринятой является проверка стабильности процесса с использованием контрольных карт. Для контроля независимых параметров процесса используется контрольная карта Шухарта [5]. При наличии коррелированных параметров применяются многомерные карты Хотеллинга [6].

Решение о том, какие карты использовать для оценки стабильности процесса, принимается на основе оценки корреляций между параметрами и проверки их значимости. С этой целью на этапе анализа процесса работы агрегата берется обучающая выборка, которая используется для оценки степени взаимосвязи контролируемых параметров и определения характеристик используемых контрольных карт.

О нарушении стабильности процесса при использовании контрольных карт, как правило, свидетельствует выход исследуемой статистики за контрольную границу. Для одномерных карт предложен ряд методов повышения их эффективности (под эффективностью понимается чувствительность карты к возможному нарушению ста-

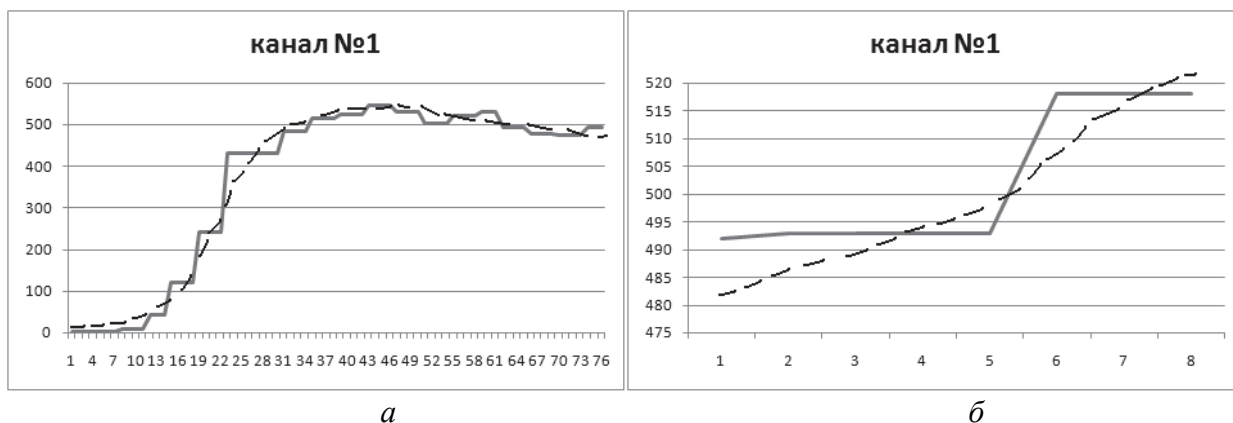


Рис. 1. Моделирование (а) и прогнозирование временного ряда (б)

бильности процесса). Предлагается чувствительность карты Хотеллинга также повысить путем использования предупреждающей границы, а также путем выявления неслучайных структур специального вида [7, 8].

В модифицированной карте Хотеллинга вводится дополнительно предупреждающая граница; область возможных значений контролируемой статистики разбивается при этом на три непересекающихся подмножества: 1) область, в которой процесс статистически управляем, 2) область, в которой процесс находится в “переходном” состоянии (в зависимости от того, как определяется положение предупреждающей границы, нахождение нескольких точек в этой области может свидетельствовать о нарушении процесса), 3) область, в которой происходит нарушение процесса.

Случай, при котором попадание двух точек подряд в предупреждающую область, свидетельствует о выходе процесса из-под контроля, рассмотрен ранее. Использование предупреждающих границ повышает чувствительность карты в диапазоне наиболее важных с практической точки зрения смещений до 23% [5]. Представляет

интерес ситуация, при которой о выходе процесса из-под контроля свидетельствует попадание в предупреждающую область трёх или четырех точек. Результаты расчета положения предупреждающих границ, проведенного методами теории марковских цепей, приведены в таблице 2.

На рис. 2 показаны возможные типы неслучайных структур на карте Хотеллинга:

а) тренд (сколько точек подряд на возрастание или на убывание в зависимости от количества контролируемых параметров может рассматриваться как неслучайная структура, т.е. вероятность появления такого количества точек соизмерима с вероятностью ложной тревоги);

б) приближение к оси абсцисс (зона С: в диапазоне до $1/3T_{кр}^2$) – сколько точек, расположенных в этой зоне, в зависимости от количества контролируемых параметров может рассматриваться как неслучайная структура,

в) приближение к контрольной границе (зона А),

г) резкие скачки на карте – на величину $kT_{кр}^2$, $k = 0,6 \text{ ÷ } 0,9...$ – при каком k при заданном количестве контролируемых показателей p соответству-

Таблица 1. Положение контрольной и предупреждающей границ карты Хотеллинга

Количество контролируемых параметров p	Количество точек между предупреждающей и контрольной границами k	Положение контрольной границы UCL	Положение предупреждающей границы UWL
2	2	12,39	5,70
	3	13,29	3,60
	4	14,10	2,55
3	2	14,89	7,44
	3	15,35	5,12
	4	15,60	3,87
5	2	19,48	10,52
	3	20,79	7,70
	4	21,19	7,64
10	2	28,40	17,61
	3	28,97	13,94
	4	30,08	12,08

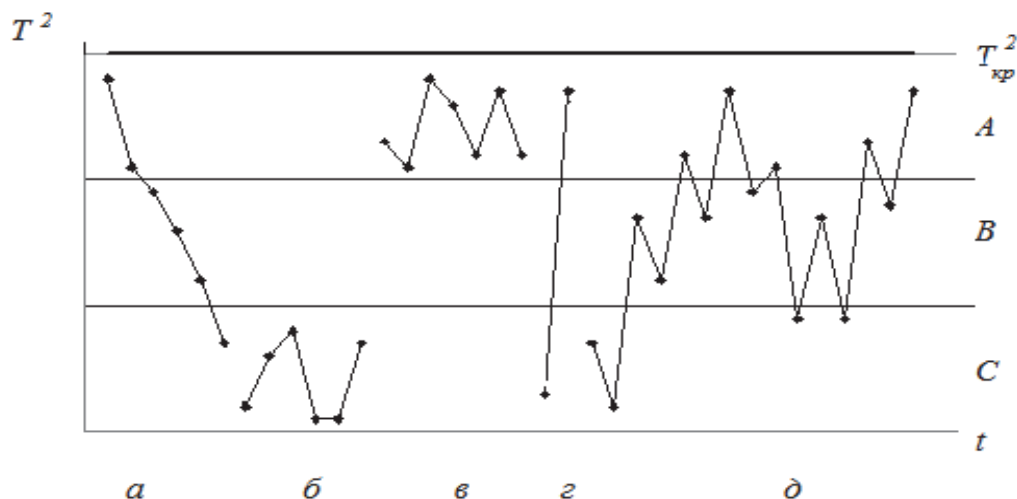


Рис. 2. Типы неслучайных структур на карте Хотеллинга

Таблица 2. Характеристики неслучайных структур на карте Хотеллинга

Структура	Критическое состояние при заданном количестве контролируемых параметров								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тренд	6 точек	6 точек	6 точек	6 точек	7 точек	7 точек	7 точек	7 точек	7 точек
Приближение к оси абсцисс	-	-	15 точек	12 точек	10 точек	9 точек	8 точек	7 точек	6 точек
Приближение к контрольной границе	2 точки из 5	2 точки из 3	2 из 3, или 3 из 10	2 из 3, или 3 из 9	3 из 8, или 4 из 15	3 из 7, или 4 из 14	3 из 6, или 4 из 13	3 из 6, или 4 из 12	3 из 6, или 4 из 11
Режие скачки	$k = 0,75$	0,75	0,70	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65
Цикличность	8 точек	9 точек	9 точек	9 точек	9 точек	10 точек	10 точек	10 точек	11 точек

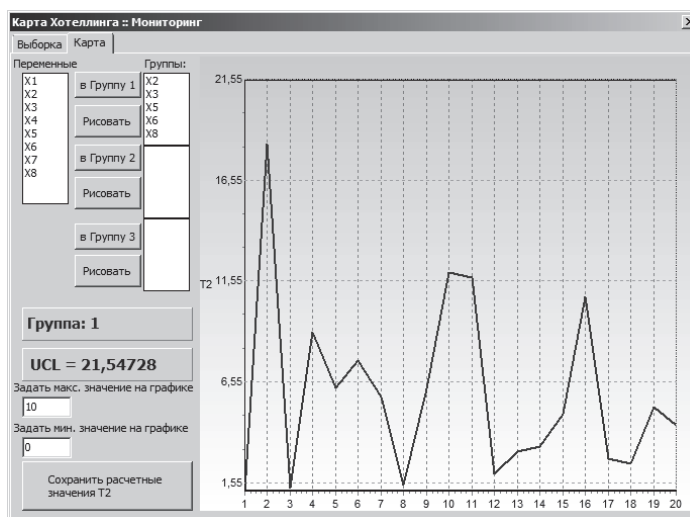


Рис. 3. Карта Хотеллинга при мониторинге процесса: в выборках 1-2 и 2-3 имеют место резкие скачки

ющий скачок на карте может рассматриваться как неслучайная структура,

д) цикличность (сколько точек, расположенных в шахматном порядке, может рассматриваться как неслучайная структура?).

Представляет интерес расчет вероятностей появления структур заданного вида на конт-

рольной карте Хотеллинга: если эта вероятность имеет тот же порядок, что и заданный уровень значимости, то соответствующая структура не может считаться случайной, и ее появление на контрольной карте свидетельствует о нестабильности процесса. В табл. 2 приведены результаты расчета, позволяющие выявить наличие неслуч-

чайной структуры на карте, и таким образом, сделать заключение о нестабильности процесса.

В качестве примера на рис. 3 показана контрольная карта Хотеллинга при мониторинге вибраций гидроагрегата: выходов точек за контрольную границу нет, однако в выборках 1-2 и 2-3 имеют место резкие скачки на величину, большую $0,70 T_{кр}^2$, что свидетельствует о нарушении стабильности процесса и возможной аварийной ситуации.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0672 (федеральная целевая программа "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Валеев С. Г.* Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. – М.: Наука, 1991. 272 с.
2. *Валеев С. Г., Клячкин В. Н.* Особенности построения регрессионных моделей при многомерном контроле технологического процесса // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2002. №1. С. 48-52.
3. *Валеев С. Г., Кувайскова Ю. Е.* Программное обеспечение обработки временных рядов техногенных характеристик // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2009. Т. 16, вып. 6. С. 1037-1038.
4. *Алешина А. А.* Использование псевдоградиента при выборе параметров модели вибраций гидроагрегата // Системы управления и информационные технологии. 2013. №1.1 (51). С. 113 – 117.
5. *Уилер Д., Чамберс Д.* Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта [пер. с англ.] М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. 409 с.
6. *Клячкин В. Н.* Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 196 с.
7. *Клячкин В. Н., Кравцов Ю. А.* Методы повышения эффективности многомерного статистического контроля процесса // Системные проблемы надёжности, качества, математического моделирования и инфотелекоммуникационных технологий в инновационных проектах. Труды Международной конференции и Российской научной школы. Часть 2. М.: НИИ предельных технологий, 2012. С. 76 – 77.
8. *Клячкин В. Н., Кравцов Ю. А.* Диагностика состояния объекта по наличию неслучайных структур на контрольных картах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. №5. С.44-50.

INFORMATION-MATHEMATICAL EARLY WARNING SYSTEM ABOUT AN EMERGENCY

© 2013 V.N. Klyachkin, J.E. Kuvajskova, A.A. Alyoshina, Ju.A. Kravtsov

Ulyanovsk State Technical University

The information-mathematical system including the block of forecasting of a condition of object by results of the decision of system of time numbers is developed for the prevention of emergency possibility on technical object by results of the control of set of parameters of its work, and in the conditions of stable work - the block of an estimation of stability by means of multidimensional control cards.

Keywords: an emergency, early detection, information-mathematical system, indications of gauges, system of time numbers, Hotelling's control chart

Vladimir Klyachkin, Doctor of Technics, Professor at the Applied Mathematics and Computer Science Department.

E-mail: v_kl@mail.ru

Julia Kuvajskova, Candidate of Technics, Associate Professor at the Applied Mathematics and Computer Science Department.

E-mail: u.kuvaiskova@mail.ru

Anna Alyoshina, Graduate Student at the Applied Mathematics and Computer Science Department.

Jury Kravtsov, Graduate Student at the Applied Mathematics and Computer Science Department.