

УДК 658.5; JEL Classification: A10, B40, C15

Как проверить соответствие факта плану

Орлов А.И.

профессор, д.э.н., д.т.н., к.ф.-м.н., профессор кафедры «Экономика и организация производства», МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва, *prof-orlov@mail.ru*

Аннотация: *Запланированный технологический или управленческий процесс всегда реализуется с некоторыми отклонениями. Достаточно ли велики отклонения для того, чтобы заявить о невыполнении плана (разладке), или же отклонения укладываются в естественные для плановой ситуации границы. Рассмотрены вероятностно-статистические модели, применяемые при разработке методов обнаружения разладки, методы на основе контрольных карт Шухарта, кумулятивных сумм, современные непараметрические методы проверки соответствия факта плану.*

Ключевые слова: *производственная система, обнаружение разладки, контрольные карты Шухарта, карты кумулятивных сумм, непараметрические методы.*

How to check the compliance of a fact with the plan

Alexander Orlov

Professor of department «Economics and organization of production», Doctor of Econ. Sc., Doctor of Techn. Sc., Cand. of math., Professor; Bauman University, Moscow

Abstract: *A planned technological or management process is always implemented with some deviations. Are the deviations large enough to declare a failure to fulfill the plan (discord), or do the deviations fit within the boundaries that are natural for the planned situation? Probabilistic-statistical models used in the development of methods for detecting discord, methods based on Shewhart control charts, cumulative sums, and modern nonparametric methods for checking the compliance of a fact with a plan are considered.*

Keywords: *production system, disorder detection, Shewhart control charts, cumulative sum charts, nonparametric methods.*

Введение

Запланированный технологический или управленческий процесс всегда реализуется с некоторыми отклонениями. И возникает вопрос о том, достаточно ли велики отклонения для того, чтобы заявить о невыполнении плана и перейти к устранению отклонений. Или же отклонения укладываются в естественные для плановой ситуации границы, и план не требует коррекции. Для выбора между этими двумя решениями к настоящему времени разработан большой арсенал

организационно-экономических методов. Активно продолжается его расширение. В настоящей работе обсудим современное состояние и перспективы развития этого арсенала.

Наиболее известными представителями рассматриваемого класса организационно-экономических методов являются методы на основе использования контрольных карт Шухарта и контрольных карт кумулятивных сумм. Их подробное описание, включая расчетные формулы, дано в разделе 10.5 учебника [1].

Речь идет о методах и алгоритмах анализа нестационарных временных рядов, когда нестационарность проявляется в форме спонтанного (непрогнозируемого, внезапного) изменения тех или иных вероятностных характеристик наблюдаемого (контролируемого) временного ряда (случайного) процесса). Такого рода нестационарность обычно называют *разладкой процесса*. Основная проблема здесь – обнаружить появление разладки, причем максимально быстро.

Решению этой задачи посвящено весьма большое число работ, причем в последнее время особое внимание уделяется разработке и использованию непараметрических методов обнаружения разладки, т. е. методов, не требующих для своего использования знания функции распределения вероятностей значений контролируемого процесса.

Это обусловлено тем, что такие методы все шире используются в составе программно-алгоритмического обеспечения АСУ ТП и систем автоматизированного мониторинга различного назначения (в промышленности, экономике и управлении, экологии, медицине и др.), когда зачастую исходная информация о статистических характеристиках наблюдаемого процесса или малодостоверна, или вообще отсутствует, и тогда необходимо проведение достаточно трудоемкого предварительного исследования процесса, или есть основания считать, что эти характеристики со временем могут постепенно изменяться.

Развитие методов обнаружения разладки

Впервые метод контрольных карт был предложен У. Шухартом в 1924 г. Суть этого метода состоит в том, что результат измерения контролируемого параметра, сделанного в текущий момент времени, сравнивался с заданными границами регулирования. Если он находится внутри границ, то технологический процесс признается налаженным и вмешательство не требуется. Если же он выходит за границы, оказывается вне допустимого интервала, то процесс признается требующим наладки. Границы обычно выбирают симметричными относительно значения контролируемого параметра, соответствующего налаженному процессу. Дальнейшая история контрольных карты Шухарта в России и за рубежом отражена в статьях [2, 3] (см. также [4]).

Затем в 1954 г. Е.-С. Пейдж разработал другой инструмент обнаружения разладки - карты кумулятивных сумм. Они основаны на анализе данных предыдущих измерений для анализа текущего состояния контролируемого параметра. А именно, суммируются отклонения от значения контролируемого параметра, соответствующего налаженному процессу, начиная с момента предыдущей наладки. Далее значение кумулятивной суммы сравнивается с заданными границами регулирования. При выходе за эти границы подается сигнал о разладке.

Задачу обнаружения разладки рассматривают как для временных рядов, так и для случайных процессов. Основное отличие состоит в том, что значения временного ряда для соседних моментов времени можно рассматривать как независимые случайные величины, в то время как для случайных процессов, имеющих непрерывные траектории, нельзя пренебрегать автокорреляцией. В настоящей статье мы ограничимся временными рядами. В области разладки случайных процессов фундаментальные результаты получены А.Н. Ширяевым [5, 6]. Его научная школа,

базирующаяся на кафедре теории вероятностей Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, продолжает активно работать и в настоящее время.

В 1970-х годах в СССР началась разработка стандартов по статистическим методам управления качеством продукции - по прикладной статистике, статистическому приемочному контролю, статистическому регулированию технологических процессов и др. В частности, были разработаны ГОСТы по контрольным картам Шухарта и кумулятивных сумм. К сожалению, в этих стандартах были обнаружены грубые ошибки. Они в 1980-х годах были найдены научным коллективом, который позже вошел в состав Всесоюзного центра статистических методов и информатики (ВЦСМИ) при Центральном правлении Всесоюзного экономического общества (директор - А.И. Орлов). Комиссию по анализу ГОСТов по статистическому регулированию технологических процессов (т. е. ГОСТы по контрольным картам Шухарта и кумулятивных сумм) возглавлял профессор Московского энергетического института Г.Ф. Филаретов. Все ГОСТы, рассмотренные этой комиссией, были признаны неадекватными. Причина - недостаточная квалификация разработчиков. Как следствие, эти ГОСТы были отменены Госстандартом. Информация по результатам анализа стандартов по статистическим методам управления качеством продукции дана в итоговой статье [7].

На замену отмененных ГОСТов ВЦСМИ разработал программные продукты [8]. В частности, по статистическому регулированию технологических процессов, т. е. по обнаружению разладки, в том числе методами контрольных карт, были разработаны пакеты программ АВРОРА и СТАТКОН. Руководителями временного творческого коллектива, результатом труда которых является АВРОРА, были А.А. Новиков (Математический институт АН СССР) и И.В. Никифоров (Институт проблем управления АН СССР). Математическая теория, реализованная в пакете АВРОРА, представлена в [9]. Пакет СТАТКОН разработан под руководством Г.Ф. Филаретова.

Методы контрольных карт Шухарта и кумулятивных сумм используются не только для обнаружения разладки технологических процессов. В [10] они применялись для контроля премиального фонда аппарата управления производственного предприятия, т. е. в менеджменте. Методам выявления отклонений в системе контроллинга (на примере мониторинга уровня безопасности полетов) посвящены работы [11, 12]. Укажем также применение при мониторинге результатов медицинских измерений, например, значений верхнего и нижнего артериального давления и частоты сердечных сокращений у больного в реанимации.

Вероятностно-статистические модели при разработке методов обнаружения разладки

Развитие теории контрольных карт Шухарта и кумулятивных сумм возможно лишь на основе вероятностно-статистических моделей [13]. Опишем простейшую из них.

Пусть результаты периодического контроля описываются случайным процессом с периодом 1, другими словами, рассмотрим временной ряд $X(1), X(2), X(3), \dots, X(t), \dots$, где $X(t)$ - результат измерения контролируемого параметра в момент времени t . Рассмотрим математическое ожидание элементов временного ряда $M[X(t)] = a(t)$. Предположим, что все разности между значениями временного ряда и соответствующими математическими ожиданиями $X(t) - a(t)$ - независимые в совокупности одинаково распределенные случайные величины.

Используют две основные модели разладки. В первой из них предполагается, что $a(t) = A$ при $t < t(0)$ и $a(t) = B$ при $t \geq t(0)$ для некоторых чисел A и B . Таким образом, разладка состоит в том, что математическое ожидание значения контролируемого параметра скачком меняется в некоторый момент времени $t(0)$. Требуется как можно

быстрее определить момент разладки $t(0)$. Для этого используют контрольные карты Шухарта. В качестве практического примера можно указать разладку станка-автомата в результате поломки резца. С точки зрения теории проверки статистических гипотез с помощью контрольных карт Шухарта проверяют нулевую гипотезу $a(t) = A$ при альтернативной гипотезе $a(t) = B$.

Во второй модели разладка происходит постепенно, например, математическое ожидание значения контролируемого параметра линейно растет с некоторого момента $t(0)$. Для обнаружения подобной разладки целесообразно применять карты кумулятивных сумм. Они позволяют быстрее обнаружить разладку, чем контрольные карты Шухарта (см. пример в [1]). Вторая модель соответствует разладке станка-автомата в случае постепенного затупления резца.

В рассматриваемых постановках необходимо рассматривать два вида рисков. При статистическом регулировании технологических процессов риск незамеченной разладки состоит в том, что разладка произошла, но это не было вовремя обнаружено, потери вызваны выпуском бракованной продукции за период между разладкой и ее обнаружением. Риск излишней наладки состоит в том, что сигнал о разладке подан ошибочно, потери связаны с простоем станка и его последующей наладкой. В случае мониторинга результатов медицинских измерений интерпретация рисков иная.

Разработано большое число различных видов контрольных карт Шухарта и кумулятивных сумм. На основе значений рисков и соответствующих потерь выбирают их параметры для решения конкретных практических задач.

При разработке многих алгоритмов обнаружения разладки исходили из предположения, что случайные величины $X(t) - a(t)$ имеют нормальные (гауссовские) распределения. Однако в прикладной статистике установлено, что распределения реальных данных, как правило, не являются нормальными [14, 15]. Поэтому исследования, направленные на разработку и изучение новых последовательных непараметрических алгоритмов обнаружения разладки с детальным систематическим анализом их характеристик и возможностей, в том числе в сравнении с аналогичными параметрическими алгоритмами, несомненно являются актуальными.

Современный этап развития методов проверки соответствия факта плану

Весьма активно ведутся исследования научной школой проф. Г.Ф. Филаретова. Продолжается разработка параметрических алгоритмов обнаружения разладки гауссовского временного ряда [16, 17]. Однако основное внимание уделяется непараметрическим методам обнаружения разладки временного ряда [18 - 20].

В качестве примера более подробно рассмотрим диссертационную работу алжирского исследователя Зинеддина Бучаала, выполненную под руководством Г.Ф. Филаретова [21]. Он систематизировал имеющиеся сведения и провел анализ существующих последовательных методов обнаружения разладки, способов получения их характеристик и примеров практического использования. Затем З. Бучаала разработал подходы к представлению сведений об исследовании различных алгоритмов обнаружения разладки с целью обеспечения корректного сопоставления результатов, полученных различными исследователями, сравнения непараметрических и параметрических методов. Он разработал три модификации оригинальных непараметрических алгоритмов обнаружения разладки, основанных на использовании механизма случайных блужданий с детальным анализом их статистических свойств и эффективности. В работе проведено формирование требований к стандартным непараметрическим критериям об отсутствии трендов и однородности распределений, когда такие критерии используются для построения непараметрических алгоритмов обнаружения разладки, функционирующих в реальном масштабе времени. В [21] проведена разработка новых непараметрических

алгоритмов на базе критерия знаков, критерия серий и критерия Рамачандрана–Ранганатана с получением справочных данных, необходимых для целей синтеза контролирующих процедур с заданными свойствами. Доказана высокая эффективность алгоритма обнаружения разладки на базе непараметрического критерия Рамачандрана–Ранганатана, сопоставимая с эффективностью аналогичных по назначению параметрических алгоритмов. Для корректного сопоставления различных алгоритмов обнаружения в [21] предложен новая характеристика – показатель относительной эффективности.

Практическая значимость результатов этой работы заключается в том, что они были использованы при разработке методического руководства по применению непараметрических алгоритмов оперативного обнаружения разладки, для развития программно-алгоритмического обеспечения периметральных систем охраны и аппаратуры вибродиагностики, выпускаемой Приборостроительным предприятием ВИСОМ. Разработанные алгоритмы имитационного моделирования реализованы в виде компьютерных программ, зарегистрированных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. Созданные в [21] алгоритмы, методы и программные средства могут использоваться в составе программно-алгоритмического обеспечения АСУ ТП и систем автоматизированного мониторинга различного назначения в научных исследованиях, при решении прикладных задач в областях, связанных с цифровой обработкой сигналов, а также в учебном процессе.

При анализе работы [21] выявляется необходимость проведения дальнейших научных исследований. Так, необходимо углубленное изучение вероятностно-статистических моделей разладки временных рядов, на основе которых теория проверки статистических гипотез даст возможность строить и изучать различные алгоритмы обнаружения разладки. В [21] рассмотрены алгоритмы обнаружения разладки на основе непараметрических критериев знаков, серий и Рамачандрана–Ранганатана. Было бы целесообразно сопоставить их свойства со свойствами алгоритмов на основе других двухвыборочных ранговых критериев - Вилкоксона (Манна - Уитни), Ван-дер-Вардена, Смирнова, Лемана - Розенблатта. В [21] отмечено, что эффективность (в принятом в статистических методах смысле) разработанных непараметрических алгоритмов, когда речь идет об обнаружении изменения дисперсии контролируемого процесса, различна для разладок в сторону увеличения и уменьшения дисперсии, причем большую эффективность имеет процедура обнаружения разладки в сторону уменьшения дисперсии, что прямо противоположно свойствам классического CUSUM-алгоритма. Однако пока нет объяснения этому факту.

Тем же научным коллективом выполнен ряд интересных работ по изучению последовательных алгоритмов обнаружения разладки временных рядов (в том числе многомерных) с помощью имитационного моделирования [22 - 24]. Отметим работу [25], посвященную последовательному алгоритму обнаружения момента изменения дисперсии временного ряда (в то время как в большинстве работ речь идет об изменении математического ожидания).

Есть и много других интересных исследований. Так, в [25], Л.А. Кузнецов и М.Г. Журавлева строят карты контроля качества с помощью непараметрического критерия Вилкоксона – Манна – Уитни [14, 15].

Выводы

Наряду со статистическим приемочным контролем (контролем партий продукции) широко применяется контроль процессов. Его проводят с помощью контрольных карт Шухарта, кумулятивных сумм и их непараметрических аналогов. Активная разработка новых математических методов контроля процессов ведется и в настоящее время. Примером является исследование алжирского ученого Зинеддина

Бучаала [21]. Его научный руководитель - ведущий отечественный специалист по контролю процессов профессор, доктор технических наук Геннадий Федорович Филаретов (Московский энергетический институт), а один из оппонентов на защите диссертации - автор настоящей работы.

Методы обнаружения разладки позволяют выявить значимые отличия "факта" от "плана", что важно для решения ряда задач контроллинга.

В современных условиях статистические методы управления качеством продукции ведутся на основе интенсивного использования информационно-коммуникационных технологий и соответствующих программных продуктов.

По нашему мнению, рекомендации, вытекающие из результатов настоящей работы, заслуживают тщательного анализа и использования в хозяйственной деятельности при решении задач экономики и управления.

Литература

1. Орлов А.И. Искусственный интеллект: статистические методы анализа данных : учебник. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 843 с.
2. Адлер Ю.П., Максимова О.В., Шпер В.Л. Контрольные карты Шухарта в России и за рубежом. Часть 1 // Стандарты и качество. 2011. № 7. С. 82-87.
3. Максимова О. В., Адлер Ю. П., Шпер В. Л. Контрольные карты Шухарта в России и за рубежом. Часть 2 // Стандарты и качество. 2011. № 8. С. 82-87.
4. Васин Л.А., Нечаев Ю.В. Проблемы применения метода Шухарта для мониторинга технологических процессов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №5. С. 133–140.
5. Ширияев А.Н. Задача скорейшего обнаружения нарушения стационарного режима // Доклады АН СССР. Т.138. №5. 1961. С. 1039–1042.
6. Ширияев А.Н. Статистический последовательный анализ. Оптимальные правила остановки. 2-е изд. М.: Наука, 1976. 272 с.
7. Орлов А.И. Сертификация и статистические методы (обобщающая статья) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1997. Т.63. №3. С. 55–62.
8. Орлов А.И. Внедрение современных статистических методов с помощью персональных компьютеров // Качество и надежность изделий. №5(21). М.: Знание, 1992. С. 51–78.
9. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. М.: Наука, 1983. 200 с.
10. Митрохин И.Н., Орлов А.И. Обнаружение разладки с помощью контрольных карт // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. №5. С. 74–78.
11. Шаров В.Д., Орлов А.И. Выявление отклонений в системе контроллинга (на примере мониторинга уровня безопасности полетов) // Green Controlling: Сборник трудов III Международного конгресса по контроллингу / Под науч. ред. С.Г. Фалько. – М.: НП «Объединение контроллеров», 2013. – С. 277–292.
12. Орлов А.И., Шаров В.Д. Выявление отклонений в контроллинге (на примере мониторинга уровня безопасности полетов) // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 95. С. 460–469.
13. Орлов А. И. Контроллинг статистических методов // Контроллинг. 2022. №4(86). С. 2–11.
14. Орлов А.И. Прикладная статистика. Учебник для вузов. — М.: Экзамен, 2006. — 671 с.
15. Орлов А.И. Прикладной статистический анализ : учебник. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 812 с.
16. Филаретов Г.Ф., Ларин А.А., Локтюшов В.А. Параметрический МА-алгоритм обнаружения разладки гауссовского временного ряда по математическому ожиданию // Вестник Московского энергетического института. 2022. № 5. С. 112–120.
17. Филаретов Г.Ф., Ларин А.А. Исследование и разработка EWMA-алгоритма обнаружения разладки гауссовского временного ряда по математическому ожиданию

- // Датчики и системы. 2022. № 6(265). С. 9–15.
18. Филаретов Г.Ф., Бучаала З. Разработка алгоритмов обнаружения разладки временных рядов на основе непараметрических критериев проверки гипотез // Вестник Московского энергетического института. 2021. № 3. С. 67–77.
 19. Червова А.А., Филаретов Г.Ф., Бучаала З. Последовательный непараметрический алгоритм обнаружения разладки временного ряда // Датчики и системы. 2020. № 1(243). С. 9–16.
 20. Филаретов Г.Ф., Бучаала З. Непараметрический метод обнаружения разладки временного ряда с использованием механизма случайных блужданий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 4(214). С. 107–117.
 21. Бучаала З. Разработка и исследование непараметрических алгоритмов обнаружения разладки временных рядов: автореф. дисс. канд. техн. наук. — М.: МЭИ, 2021. — 21 с.
 22. Сивова Д.Г., Филаретов Г.Ф. Последовательный алгоритм обнаружения момента изменения характеристик векторных временных рядов // Вестник Московского энергетического института. 2014. № 2. С. 63–69.
 23. Филаретов Г.Ф., Симоненков П.С. Многомерный алгоритм кумулятивных сумм для обнаружения изменений характеристик временных рядов // Вестник Московского энергетического института. 2021. № 1. С. 86–94.
 24. Репин И.Д., Рябов С.Н., Филаретов Г.Ф. Программное обеспечение имитационного моделирования последовательных алгоритмов обнаружения разладки временных рядов // Естественные и технические науки. 2022. №12(175). – С. 389–393.
 25. Филаретов Г.Ф., Червова А.А. Последовательный алгоритм обнаружения момента изменения дисперсии временного ряда // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. №3. С. 75–82.
 26. Кузнецов Л.А., Журавлева М.Г. Построение карт контроля качества с помощью непараметрического критерия Вилкоксона – Манна – Уитни // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. №1, с. 70–95.