

На правах рукописи



Алексеева Анастасия Валерьевна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
КОНТРОЛЯ МНОГОМЕРНОГО РАССЕЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (информационные технологии и промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск - 2022

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и информатики в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Клячкин Владимир Николаевич

Официальные оппоненты **Иванов Александр Куприянович**,
доктор технических наук,
Федеральный научно-производственный центр
АО «НПО «Марс» (г. Ульяновск),
главный научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела-2
Седова Наталья Олеговна,
доктор физико-математических наук,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ульяновский государственный университет»
профессор кафедры информационной безопасности и теории управления

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП)

Защита состоится 07 сентября 2022 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.277.04 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», расположенном по адресу: Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, Главный корпус, ауд. 211

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного технического университета и на сайте вуза <http://www.ulstu.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



А.М. Наместников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Повышение эффективности функционирования сложных технических систем с использованием современных методов обработки информации, обеспечение их надежности и качества – одна из основных задач системного анализа. Одним из направлений решения этой задачи является повышение эффективности контроля показателей функционирования таких систем.

Для многих систем наиболее важным является обеспечение стабильности этих показателей. Например, для обеспечения надежности функционирования гидроагрегата проводится мониторинг его вибраций: нарушение стабильности вибраций в условиях установившегося режима свидетельствует о сбоях в работе системы. Диагностика технического состояния производится по результатам непрерывного вибромониторинга. Работа гидроагрегата определяется вибрациями нижнего и верхнего генераторного подшипника, боем вала гидротурбины и другими показателями. Данные в режиме реального времени поступают на стойку управления гидроагрегатом, где производится обработка соответствующей информации. При слишком больших вибрациях снижается нагрузка, а если вибрации достигают критических значений, производится останов гидроагрегата.

Другой пример: для обеспечения качества питьевой воды проводится мониторинг показателей как водоисточника, так и физико-химических и бактериологических показателей очистки в системе водоочистки. При прогнозировании неисправности системы (когда показатели качества питьевой воды могут не соответствовать требованиям) осуществляется изменение доз реагентов или долив чистой воды. Недостаточная эффективность контроля может привести как к необоснованным остановкам системы, так и к пропускам неисправностей.

Мониторинг стабильности показателей функционирования систем может быть осуществлен с применением методов статистического управления процессами. Основным из этих методов является применение контрольных карт Шухарта, регламентированных стандартами. Однако сложные технические системы характеризуются наличием множества коррелированных показателей функционирования, для которых использование стандартных подходов приводит к существенным погрешностям: необходимо применение многомерных методов.

Контроль среднего уровня многопараметрического процесса проводится на основе алгоритма Хотеллинга, который к настоящему времени сравнительно хорошо изучен. Для мониторинга многомерного рассеяния используется алгоритм обобщенной дисперсии: предполагается, что рассеяние множества показателей можно охарактеризовать с помощью обобщенной дисперсии – определителя ковариационной матрицы. Контроль на основе этого алгоритма стал активно применяться лишь с 90-х годов прошлого века, однако вопросы, связан-

ные с эффективностью такого подхода изучены недостаточно; это обстоятельство и обуславливает актуальность исследования.

Объектом исследования в диссертационной работе является стабильность функционирования сложных технических систем по критерию многомерного рассеяния, в частности, рассматривается приложение предложенных методов и алгоритмов к оценке стабильности вибраций гидроагрегата, анализу исправности системы водоочистки, технологии производства минераловатных теплоизоляционных плит.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы, обеспечивающие повышение эффективности контроля стабильности рассеяния показателей функционирования сложных технических систем.

Область исследования соответствует двум пунктам паспорта специальности 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации.

П.4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации: в диссертационном исследовании разработаны методы и алгоритмы оптимизации параметров контроля рассеяния показателей функционирования сложных технических систем с целью повышения эффективности управления.

П.11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем: предложенные методы повышения эффективности многомерного статистического контроля рассеяния обеспечивают прогнозирование возможных нарушений и повышение надежности функционирования сложных технических систем.

Цель работы

– обеспечение стабильности функционирования сложных технических систем на основе более эффективных методов и алгоритмов контроля показателей работы этих систем по сравнению с картой обобщенной дисперсии.

Для достижения поставленной цели решаются задачи:

- разработка методов и алгоритмов оптимизации параметров многомерного статистического контроля рассеяния показателей функционирования сложных технических систем на основе алгоритма обобщенной дисперсии по двум критериям: минимизации времени до обнаружения нарушения и минимизации затрат, связанных с контролем;
- разработка методов повышения эффективности контроля на основе алгоритма обобщенной дисперсии;
- разработка программы для проведения испытаний по оценке эффективности многомерного статистического контроля рассеяния и проведение таких испытаний;
- разработка алгоритма и программы для многомерного статистического контроля показателей функционирования сложных технических систем с применением разработанных методов;

- оценка эффективности разработанных методов и программных средств и численное исследование на реальных технических объектах.

Методы исследования

При решении задач исследования применялись методы системного анализа, теории вероятности, математической статистики, численные методы и методы оптимизации. При разработке программного комплекса использовались методы объектно-ориентированного программирования.

Научной новизной обладают:

- впервые разработанные методы поиска оптимальных значений объема выборки, частоты взятия выборок и положения контрольных границ для алгоритма обобщенной дисперсии при мониторинге рассеяния многопараметрического процесса, отличающиеся от существующих методов выбора этих параметров возможностью минимизации времени до обнаружения нарушения и стоимости контроля;

- предложенные новые методы повышения эффективности контроля многомерного рассеяния, отличающиеся от стандартного алгоритма использованием дополнительных критериев для обнаружения признаков нарушения процесса: эффективность этих методов подтверждена проведением статистических испытаний и обработкой информации по показателям функционирования для реальных технических объектов;

- полученные с использованием предложенных методов и алгоритмов новые результаты численного исследования стабильности функционирования реальных технических объектов, отличающиеся применением поиска структур специального вида и предупреждающей границы на карте обобщенной дисперсии;

- алгоритмы и программы статистического контроля коррелированных показателей функционирования сложных технических систем, отличающиеся использованием разработанных методов с целью повышения эффективности контроля многомерного рассеяния.

Достоверность проведенного исследования обеспечивается корректным применением методов системного анализа, теории вероятности, математической статистики, численных методов, методов оптимизации, методов объектно-ориентированного программирования, а также подтверждается результатами проведенных испытаний.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых методов и алгоритмов поиска оптимальных параметров контроля многомерного рассеяния, обеспечивающих повышение эффективности мониторинга показателей функционирования сложных технических систем.

Практическая значимость работы заключается в том, что, использование разработанных алгоритмов и программного обеспечения на основе пред-

ложенных методов обеспечивает повышение стабильности функционирования и надежности работы технических объектов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1) Разработанные методы поиска значений объема выборки, частоты взятия выборок и положения контрольных границ алгоритма обобщенной дисперсии обеспечивают в зависимости от поставленной задачи минимизацию времени обнаружения нарушения стабильности процесса функционирования технического объекта или затраты, связанные с контролем.

2) Предложенные новые методы мониторинга многомерного рассеяния с использованием поиска структур специального вида, применения предупреждающей границы и алгоритма экспоненциально взвешенных скользящих средних обеспечивают повышение эффективности контроля стабильности функционирования сложных технических систем по сравнению со стандартной картой обобщенной дисперсии.

3) Полученные с использованием предложенных методов и алгоритмов результаты численного исследования стабильности функционирования реальных технических систем свидетельствуют об эффективности этих подходов.

4) Разработанные алгоритмы и программы многомерного статистического контроля показателей функционирования сложных технических систем с применением предложенных методов могут быть использованы при решении практических задач обеспечения стабильности функционирования технических систем.

Реализация и внедрение результатов работы.

Диссертационная работа выполнялась при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области по проекту №18-48-730001.

Результаты исследования внедрены в ООО «Евроизол» (г. Ульяновск) при разработке технологии производства минераловатных теплоизоляционных плит для контроля прочностных показателей.

Результаты диссертационной работы также используются в учебном процессе Ульяновского государственного технического университета в дисциплинах «Теория надежности», «Статистический контроль и управление процессами», «Статистические методы прогнозирования», читаемых студентам, обучающимся в бакалавриате и магистратуре по направлению «Прикладная математика», а также «Статистические методы в управлении качеством» по направлению «Управление качеством».

Апробация работы. Результаты исследования докладывались на научно-технических конференциях Ульяновского государственного технического университета в 2017 – 2022 г.г., Международном форуме «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021 и 2022 г.г.), Междуна-

родной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (Алушта, 2020 г.), Международной конференции и молодежной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2020 и 2021 г.г.), Международной научно-технической конференция «IT-технологии: развитие и приложения» (Владикавказ, 2018 г.), Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии» (Самарский научный центр РАН, 2018 г.), научно-практической международной конференции молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (Тольятти, 2019 г.) и других.

Публикации по теме диссертации. По результатам диссертационного исследования опубликованы 22 научные работы (из них четыре статьи без соавторов), в том числе восемь статей в журналах по перечню ВАК и четыре статьи в изданиях, индексируемых Scopus. Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Сведения о личном вкладе автора. Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все основные теоретические и практические исследования проведены автором диссертационной работы самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников из 110 наименований. Объём диссертации составляет 150 страниц, включая 70 рисунков, 2 таблиц и приложения, в которых представлены копии документов о внедрении результатов проведенных исследований и свидетельств о государственной регистрации разработанных программ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об использовании, реализации и апробации результатов работы.

В первой главе проведен краткий обзор исследований в области многомерного статистического контроля показателей функционирования сложных технических систем.

Для мониторинга независимых показателей могут быть использованы стандартные карты Шухарта. Рассмотрены разновидности таких карт, в частности, карты, используемые для контроля рассеяния. Проанализированы возможные ошибки при контроле процесса, а также методы оценки эффективности

этих карт. Исследованы различные подходы, обеспечивающие повышение эффективности карт Шухарта.

При мониторинге среднего уровня коррелированных показателей функционирования системы используются методы, основанные на алгоритме Хотеллинга. Рассмотрены различные варианты определения критических значений, методы оценки эффективности, подходы, используемые для повышения эффективности контроля с помощью карты Хотеллинга.

Для контроля многомерного рассеяния Д. Монтгомери, а позднее и Д. Апаризи предложили использовать алгоритм обобщенной дисперсии – определителя ковариационной матрицы. Для построения карты обобщенной дисперсии используется асимптотически нормальное приближение.

Использование методов статистического контроля для диагностики стабильности функционирования сложных технических систем помогает предотвратить нарушения стабильности до выхода значений контролируемых показателей процесса за границы допуска. Однако часто рассмотренные методы контроля недостаточно быстро реагируют на возникающие нарушения, особенно связанные с увеличением многомерного рассеяния – эта проблема до настоящего времени проработана недостаточно. Сократить время нахождения процесса в нестабильном состоянии позволяет оптимизация параметров контроля, таких как: объем выборки, периодичность взятия выборок и положения границ.

Обзор современного состояния проблемы многомерного контроля стабильности функционирования сложных технических систем позволил сформулировать перечисленные выше задачи исследования.

Во второй главе разработаны методы и алгоритмы контроля многомерного рассеяния показателей функционирования сложных технических систем. Эффективная система контроля показателей помогает обеспечить своевременное действие по обеспечению стабильности работы объекта, информировать о различных нарушениях и отказах, осуществлять их оперативное выявление и устранение с минимальными затратами ресурсов.

Повысить эффективность контроля многомерного рассеяния показателей процесса позволяет подбор оптимальных параметров алгоритма обобщенной дисперсии на этапе подготовки к проведению контроля. Для многих процессов очень важно, чтобы время, в течение которого процесс нестабилен, было минимально. В связи с этим, варьируя параметры контроля (количество измерений в выборке, интервал времени между выборками и положение контрольных границ), можно добиться скорейшего обнаружения нарушений.

Основоположником подхода к определению оптимальных параметров контрольных карт, является американский ученый А. Дункан, который применил данный подход для карт Шухарта. Исследуемый процесс представлен серией независимых циклов восстановления, смена которых происходит после вы-

хода процесса из статистически управляемого состояния, выявления и устранения причин нарушений.

Каждый цикл восстановления можно разделить на четыре временных интервала (рис. 1): интервал времени, в течение которого процесс находится в управляемом (стабильном) состоянии; интервал времени, в течение которого произошедшее нарушение еще не было обнаружено; интервал времени, необходимый для взятия выборки и проведения расчетов; интервал времени между обнаружением признаков нарушения и его устранением.

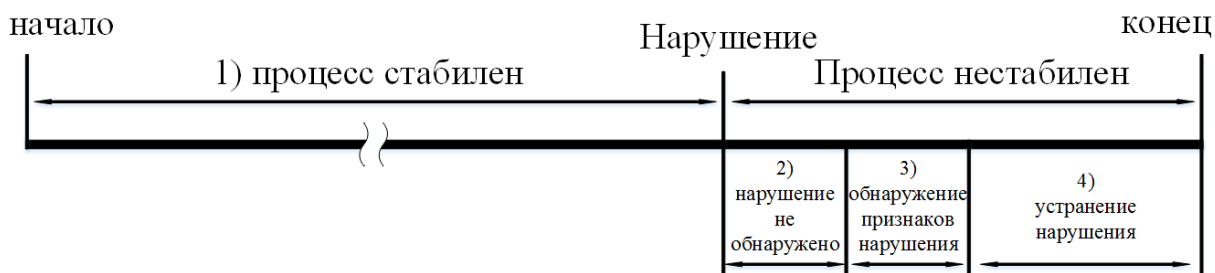


Рисунок 1– Структура цикла регулировки

При построении модели Дункана предполагается, что время начала нарушений подчиняется закону распределения Пуассона с параметром λ , интервал времени от начала контроля до появления нарушения определяется как математическое ожидание $1/\lambda$.

Подобный подход можно применить и для оптимизации параметров карты обобщенной дисперсии. Самым распространенным нарушением процесса считается резкое скачкообразное повышение рассеяния, т.е. определитель ковариационной матрицы Σ , который является обобщенной дисперсией, возрастет в d раз по сравнению с определителем ковариационной матрицы стабильного процесса Σ_0

$$|\Sigma| = d|\Sigma_0| \quad (1)$$

Время, необходимое для обработки элемента выборки, предполагается постоянной величиной g , тогда длина интервала времени, необходимого для взятия выборки и проведения расчетов, равна произведению ng . Длительность периода поиска нарушения после появления сигнала от карты также предполагается постоянной величиной D .

Тогда математическое ожидание периода, когда процесс находится в нестабильном состоянии определяется как

$$M(T_0) = \frac{h}{1-\beta} - \frac{1-(1+\lambda h)e^{-\lambda h}}{\lambda(1-e^{-\lambda h})} + ng + D \quad (2)$$

Вероятность ошибки второго рода β , когда обобщенная дисперсия повысилась, но на карте отсутствуют точки, лежащие в критической области за контрольными границами, вычисляется по формуле

$$\begin{aligned}\beta &= P(LCL < |\Sigma| < UCL; |\Sigma| = d|\Sigma_0|) = \\ &= \Phi \left[\frac{UCL - m_{|\Sigma|}}{\sigma_{|\Sigma|}} \right] - \Phi \left[\frac{LCL - m_{|\Sigma|}}{\sigma_{|\Sigma|}} \right].\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь UCL и LCL – границы доверительного интервала для нормально распределенной обобщенной дисперсии с математическим ожиданием $m_{|\Sigma|}$ и стандартным отклонением $\sigma_{|\Sigma|}$.

Для вероятности ошибки второго рода при увеличении дисперсии в d раз получим зависимость

$$\beta = \Phi \left[\frac{u_{1-\alpha/2}}{d} - \frac{b_1(d-1)}{d\sqrt{b_2}} \right] - \Phi \left[-\frac{u_{1-\alpha/2}}{d} - \frac{b_1(d-1)}{d\sqrt{b_2}} \right], \quad (4)$$

где $u_{1-\alpha/2}$ – квантиль нормального распределения порядка $1 - \alpha/2$, α – уровень значимости; коэффициенты b_1 и b_2 вычисляются по формулам:

$$b_1 = \frac{1}{(n-1)^p} \prod_{i=1}^p (n-i) \quad (5)$$

$$b_2 = \frac{1}{(n-1)^{2p}} \prod_{i=1}^p (n-i) \left[\prod_{j=1}^p (n-j+2) - \prod_{j=1}^p (n-j) \right]. \quad (6)$$

Здесь p – количество контролируемых показателей, n – объем выборки.

Таким образом, для оптимизации параметров карты обобщенной дисперсии необходимо по результатам предшествующих исследований определить среднее время пребывания процесса в стабильном состоянии $1/\lambda$ и приемлемое увеличение обобщенной дисперсии d , вычислить по обучающей выборке величину целевой обобщенной дисперсии $|\Sigma_0|$, зная при этом среднее время обработки одного элемента выборки g и длительность периода поиска нарушения после его выявления D .

Тогда минимизировав функцию (2) с учетом соотношения (4), можно найти оптимальные значения объема выборки, интервала между выборками и положения контрольных границ, при которых время пребывания процесса в разлаженном состоянии будет минимальным. При этом можно задать дополнительные ограничения $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$, $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$ и $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$, которые оцениваются специалистом по конкретному процессу.

Оптимизация процесса только по критерию минимального периода времени, в течение которого он находится в нестабильном состоянии может оказаться экономически нецелесообразной в условиях реального процесса и привести к тому, что найденные параметры алгоритма обобщенной дисперсии спровоцируют удорожание контроля.

При минимизации затрат на контроль предполагается, что почасовые доходы при стабильном и нестабильном состояниях процесса равны V_0 и V_1 соответственно. Затраты на взятие выборки объема n и обработку результатов можно представить в форме: $a_1 + a_2 n$, где a_1 и a_2 – постоянная и переменная состав-

ляющие затрат соответственно. Затраты на поиск нарушения процесса принимаются равными величине a_3 , а затраты на исследование сигнала ложной тревоги – величине a'_3 .

Исходя из представления цикла в виде суммы четырех интервалов, А. Дункан оценил среднюю продолжительность цикла восстановления как

$$M(T) = \frac{1}{\lambda} + \frac{h}{1-\beta} - \frac{1-(1+\lambda h)e^{-\lambda h}}{\lambda(1-e^{-\lambda h})} + ng + D \quad (7)$$

а длительность нестабильного состояния процесса определяется по формуле (3), тогда средние затраты

$$M(C) = V_0 \frac{1}{\lambda} + V_1 M(T_0) - a_3 - \frac{a'_3 e^{-\lambda h}}{1-e^{-\lambda h}} - \frac{(a_1 + a_2 n)(M(T))}{h} \quad (8)$$

В результате получена целевая функция, которая зависит от параметров карты обобщенной дисперсии и характеристик самого процесса. Чтобы найти оптимальные значения параметров карты обобщенной дисперсии: объема мгновенной выборки n , интервала между выборками h и уровня значимости α , который определяет положение контрольных границ, необходимо минимизировать функцию математического ожидания средних затрат (8) с помощью подходящих численных методов оптимизации.

Для повышения эффективности статистического контроля процесса с точки зрения сокращения времени обнаружения нарушения, предлагается три метода:

1. Поиск структур специального вида на карте обобщенной дисперсии, которые наряду с попаданием значения контролируемого показателя выборки за контрольные границы свидетельствуют о нарушении стабильности процесса, т.к. вероятность возникновения подобных структур во время нормального хода процесса сравнительно мала – соизмерима с вероятностью ложной тревоги.

2. Применение предупреждающей границы на контрольной карте: попадание нескольких точек подряд (от двух до четырех) между предупреждающей и контрольной границами свидетельствует о нарушении процесса.

3. Построение карты экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии.

Так как алгоритм обобщенной дисперсии применим в условиях нормально распределенных данных, а также, как правило, основывается на правиле «трех сигма», то для повышения эффективности карты обобщенной дисперсии можно использовать тот же метод анализа случайных структур точек на карте, что и для карт Шухарта.

Целесообразно провести анализ следующих специфических структур на карте обобщенной дисперсии:

- а) шесть убывающих или возрастающих точек подряд (тренд);

б) выход хотя бы двух из трех последовательных точек за двухсигмовые пределы;

в) семь точек подряд по одну сторону от центральной линии;

г) выход хотя бы четырех из пяти последовательных точек за односигмовые пределы;

д) девять точек подряд вблизи от центральной линии в односигмовых пределах;

Графически перечисленные объединения точек в структуры специального вида проиллюстрированы на рис. 2.

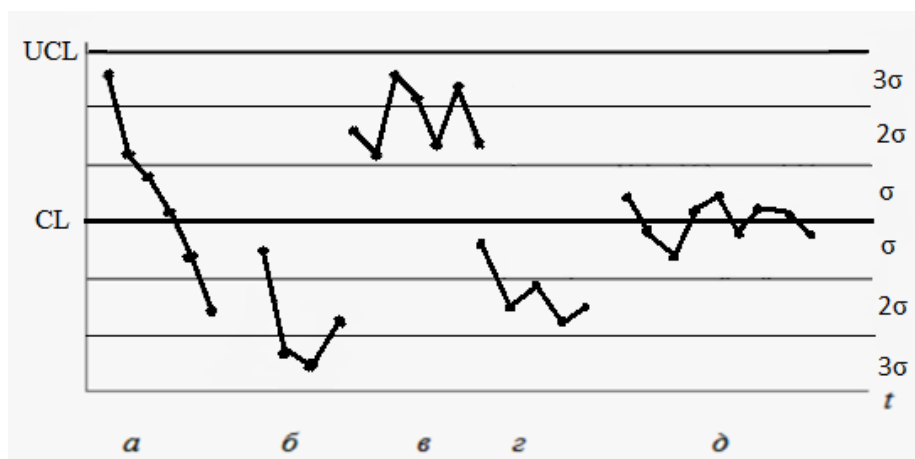


Рисунок 2 – Структуры специального вида на карте обобщенной дисперсии

Еще одним методом повышения эффективности статистического контроля многомерного рассеяния является применение карты обобщенной дисперсии, где помимо контрольных границ, которые регистрируют резкие крупные изменения в процессе, имеется дополнительная область, которая регистрирует незначительные медленно формирующиеся изменения в процессе.

Предупреждающая область формируется между предупреждающими и контрольными границами. Тогда вся область потенциальных значений контролируемых показателей разбивается на три подобласти:

а) область, при попадании точек в которую процесс считается стабильным;

б) область, при попадании в которую заданного количества точек (обычно двух, трех или четырех) считается нарушением стабильности процесса (нахождение в данной переходной области меньшего количества точек не влечет за собой корректировки процесса);

в) область за контрольной границей, в которой наступает нарушение процесса.

Для определения положения контрольной и предупреждающей границ используется аппарат теории марковских цепей; для практических расчетов можно воспользоваться стандартом для карты средних значений, поскольку эти

карты, как и карты обобщенной дисперсии, строятся на основе правила «трех сигма».

Сигналом о выходе процесса из-под контроля служит не только выход точек за контрольную границу, но и попадание заданного количества k точек подряд в предупреждающую область, выше предупреждающей линии.

Карта экспоненциально взвешенных скользящих средних позволяет обнаружить небольшие смещения уровня процесса. Применительно к обобщенной дисперсии этот вид карт также может повысить ее эффективность.

При построении данной карты нужно найти ее параметры и расчетные значения. Значения, наносимые на карту, определяются по формуле:

$$E_t = (1 - a)E_{t-1} + a|\Sigma_t| \quad (9)$$

где a – параметр экспоненциального сглаживания ($0 < a < 1$); E_{t-1} – предыдущее расчетное значение; $|\Sigma_t|$ – обобщенная дисперсия текущей выборки.

Нестабильность процесса определяется как попадание расчетных значений в критическую область за контрольные границы. Контрольные границы карты экспоненциально взвешенной скользящей средней для обобщенной дисперсии рассчитываются по формуле:

$$\left. \begin{matrix} UCL \\ LCL \end{matrix} \right\} = |\Sigma_0| \pm H\sigma_{E_t} \quad (10)$$

где H – параметр, устанавливающий положение границ (обычно принимают $H = 3$); σ_{E_t} можно найти из формулы:

$$\sigma_{|E_t|}^2 = \frac{\sigma_{|\Sigma|}^2}{n} \frac{a}{2-a} [1 - (1 - a)^{2t}] \quad (11)$$

где $\sigma_{|E_t|}$ – оценка стандартного отклонения величин E_t .

Основной характеристикой для сравнения рассмотренных выше методов повышения эффективности карты обобщенной дисперсии при мониторинге многомерного рассеяния процесса является средняя длина серий – количество наблюдений от момента нарушения процесса до момента обнаружения этого нарушения. Для оценки средней длины серий проводились статистические испытания. Для получения достоверных результатов испытаний необходимо иметь множество выборок (желательно не менее 1000). Получить такое количество данных из реального процесса не всегда представляется возможным и целесообразным, т.к. свойства процесса часто неизвестны и, как следствие, невозможно предсказать результат, полученный при испытаниях. С этой целью необходимо смоделировать последовательности многомерных данных по нормальному закону распределения с векторами средних значений и ковариационными матрицами, аналогичными найденным по обучающей выборке.

Также при различных модификациях контроля необходимо смоделировать потенциальные нарушения процесса. На каждой смоделированной выборке, которая по своим параметрам соответствует стабильному состоянию реального

процесса, с некоторого заданного момента поочередно задаются два наиболее распространенных вида нарушений: скачкообразное увеличение рассеяния от 1,25 до 2 раз с шагом 0,25 (т.е. d из формулы (2) принимает значения 1,25; 1,5; 1,75; 2), а также плавное увеличение рассеяния при характеристике интенсивности тренда $d_0 = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04$ и $0,05$.

Для каждой смоделированной выборки рассчитывалась карта обобщенной дисперсии, по которой и определялась длина серий при соответствующем признаке нарушения в этой выборке. При усреднении полученных данных по всем 1000 выборкам находится средняя длина серии заданного нарушения при соответствующей характеристике d и d_0 .

На рис. 3 приведены кривые зависимости средней длины серий от параметра нарушения процесса d при скачкообразном изменении рассеяния для трех описанных подходов повышения эффективности алгоритма обобщенной дисперсии в сравнении с обычной картой обобщенной дисперсии.

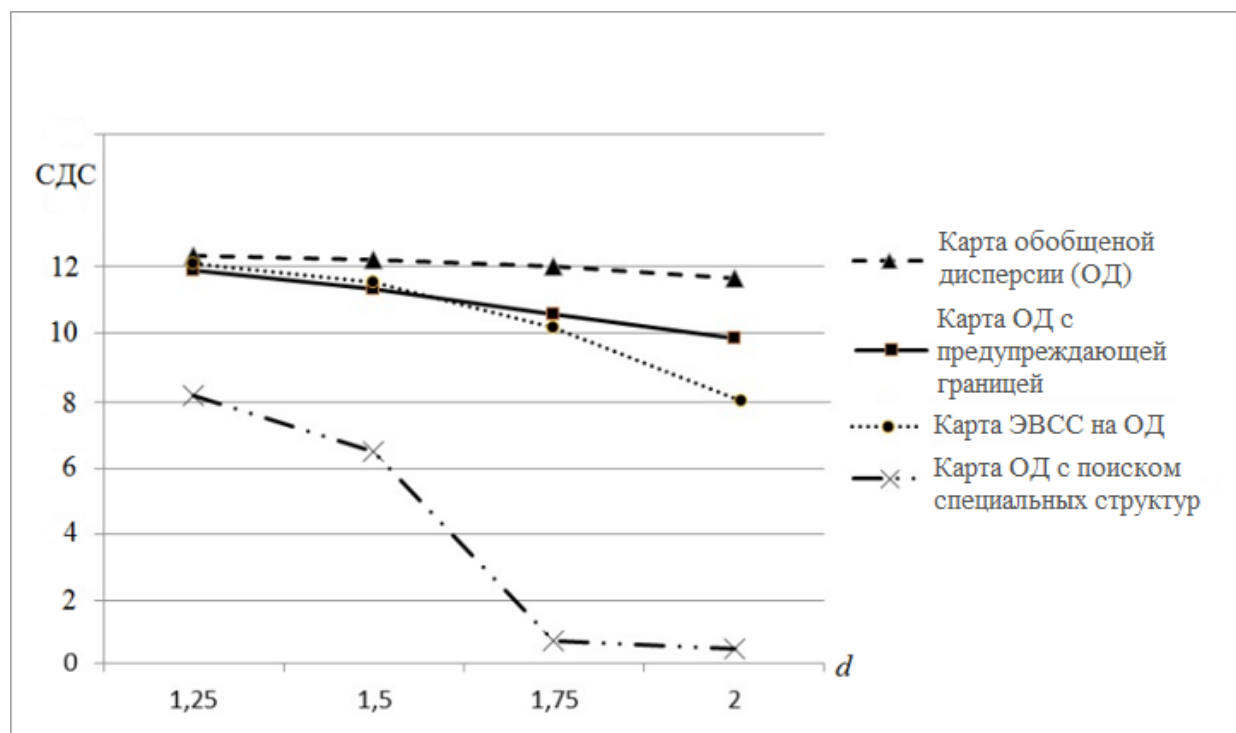


Рисунок 3– Кривые средней длины серий при скачкообразном изменении рассеяния

Как видно из результатов испытаний, лучшим методом повышения эффективности карты обобщенной дисперсии оказался анализ структур специального вида («неслучайные структуры»), т.к. соответствующая кривая находится ниже, чем у других, и его средняя длина серий получилась минимальной, т.е. количество выборок, необходимых для обнаружения нарушения после наступления этого нарушения меньше, чем у других методов контроля.

В третьей главе представлены результаты разработки алгоритма и программного обеспечения для контроля рассеяния показателей. Различные методы модификации алгоритма обобщенной дисперсии для повышения его эффективности к возможным нарушениям процесса – поиск неслучайных структур на карте обобщенной дисперсии, использование предупреждающей границы и принципа экспоненциального сглаживания, а также подбора оптимальных параметров карты обобщенной дисперсии по критерию минимального времени обнаружения нарушений и стоимости контроля – требуют разработки соответствующих программ.

Общая схема контроля включает следующие этапы:

1. Исследование существующих методов контроля с целью выявления типичных нарушений, их частоты, а также оценки экономических характеристик контроля.

2. Выбор параметров контроля: объема выборки, частоты взятия выборок и вероятности ложной тревоги (проводится экспертно или путем решения оптимизационной задачи).

3. Предварительный анализ контроля стабильного процесса для оценки значения целевой обобщенной дисперсии и положения контрольных границ.

4. Постоянный мониторинг процесса с целью выявления признаков нарушения его стабильности с применением предложенных методов и – при необходимости – корректировки процесса.

Основной программный алгоритм, блок-схема которого представлена на рисунке 4, включает выполнение этапов 3-4:

- контроль среднего уровня процесса на базе алгоритма Хотеллинга (задачей диссертационного исследования является разработка методики контроля многомерного рассеяния, однако при практическом проведении контроля вначале обычно строится карта Хотеллинга);

- нормализация данных в случае, если их начальное распределение отличается от нормального;

- контроль рассеяния процесса на базе алгоритма обобщенной дисперсии;

- задание возможных нарушений процесса путем увеличения рассеяния для проведения статистических испытаний;

- оценка эффективности алгоритма обобщенной дисперсии путем подсчета средней длины серий;

- преобразование алгоритма обобщенной дисперсии рассмотренными методами повышения эффективности;

- оценка средней длины серий при применении различных методов;

- мониторинг процесса.

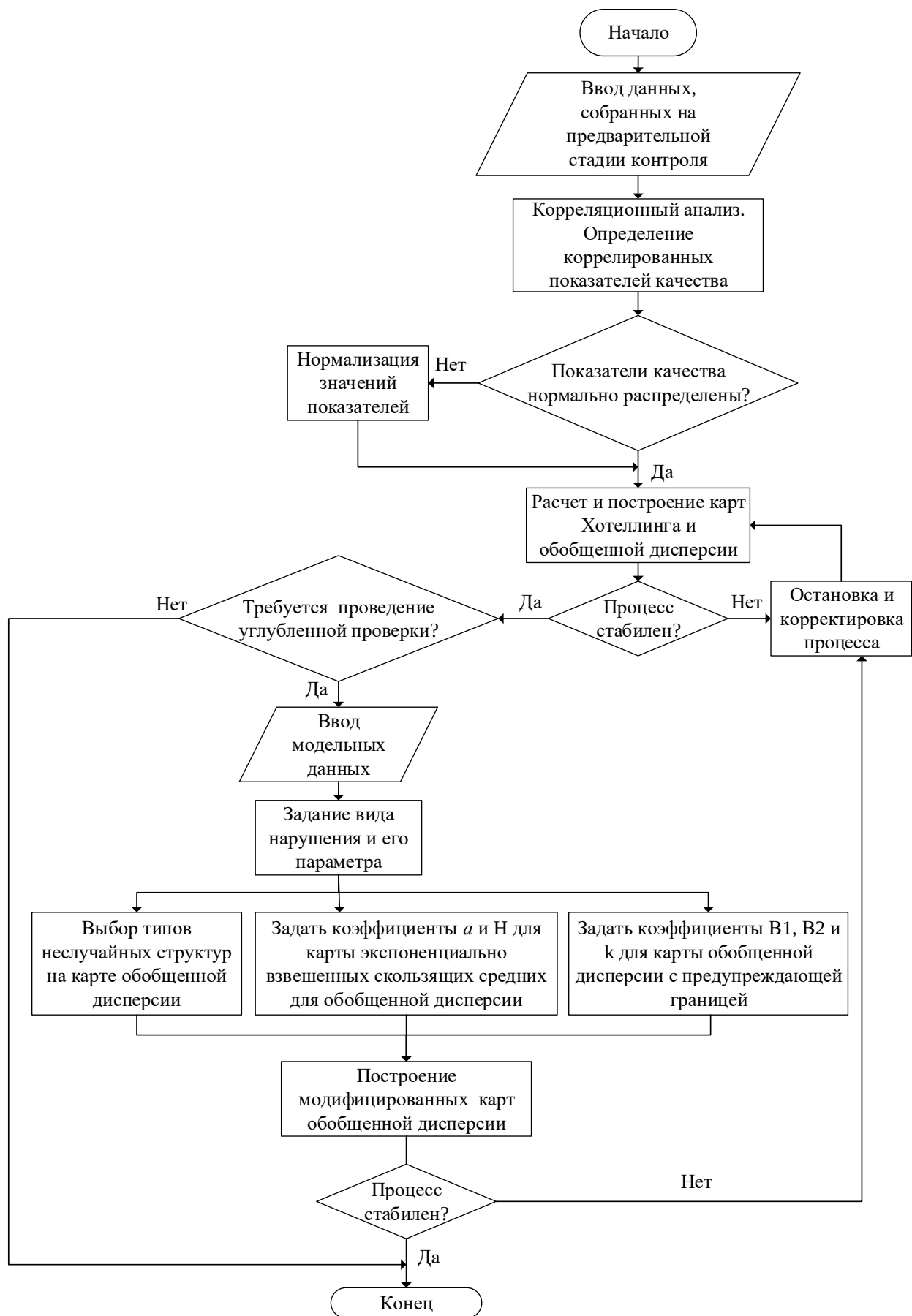


Рисунок 4 – Блок-схема контроля процесса

На рис. 5 показана построенная с помощью этой программы карта обобщенной дисперсии со смоделированным скачкообразным увеличением рассеяния процесса, начиная с 5 выборки.

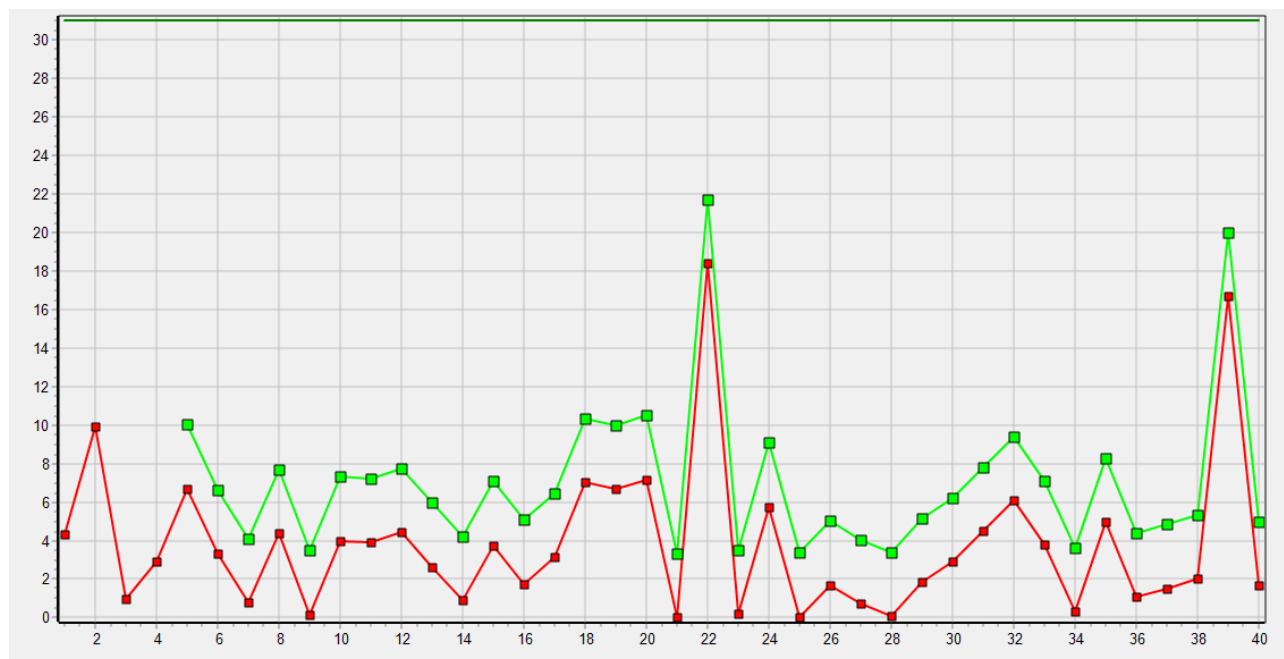


Рисунок 5 – Карта обобщенной дисперсии при скачкообразном увеличении рассеяния

Программа поиска оптимальных значений параметров контрольных карт использует библиотеку Pythonc открытым исходным кодом *scipy*, предназначенным для научных и инженерных расчётов, из которой подключены модули *optimize* и *stats*. Модуль *optimize* обеспечивает нахождение как условного, так и безусловного экстремума функции.

Для поиска условного минимума функции используется функция:

```
minimize(f, x0, method='trust-constr', bounds=bnds)
```

где f – целевая функция, $x0$ – вектор условий (вектор задания интервалов h , n , и α), *method* – выбранный метод оптимизации, *bounds* – область поиска минимума функции.

В программе реализовано нахождение минимума функции тремя методами:

1. Поиск локального минимума в доверительной области (*trust-constr*). Доверительная область – это аналог доверительного интервала в случае многопараметрической целевой функции, которая аппроксимируется числовой функцией. Если аппроксимирующая числовая функция соответствует целевой с заданной точностью внутри доверительной области, данная область расширяется, если же точность аппроксимации недостаточна – область сужается. Под точностью аппроксимации в данном случае имеют в виду ширину доверительной области.

2.Метод Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (l-bfgs-b). Он относится к итерационным квазиньютоновским методам численной оптимизации. Применение данного метода не предполагает вычисления частных производных второго порядка, т.к. нет необходимости в определении гессиана функции напрямую. Гессиан определяется приближенно, исходя из предыдущих итераций, чем и отличается данный метод от ньютоновских.

3.Метод Нелдера-Мида является довольно надежным и эффективным методом прямого поиска, т.е. использующим только значения функции. Данный метод относится к симплексным методам.

Блок-схема алгоритма оптимизации параметров контроля представлена на рис. 6.

Использование трех методов обусловлено тем, что при различных исходных данных наилучший результат получается разными методами. Например, как видно из рис. 7, метод trust-constr обеспечил стоимость контроля 443 у.е., а два других метода дали лучший результат – 234 у.е., при этом объем выборки $n = 3$, частота отбора выборок $h = 0,4$ часа; уровень значимости $\alpha = 0,0001$.

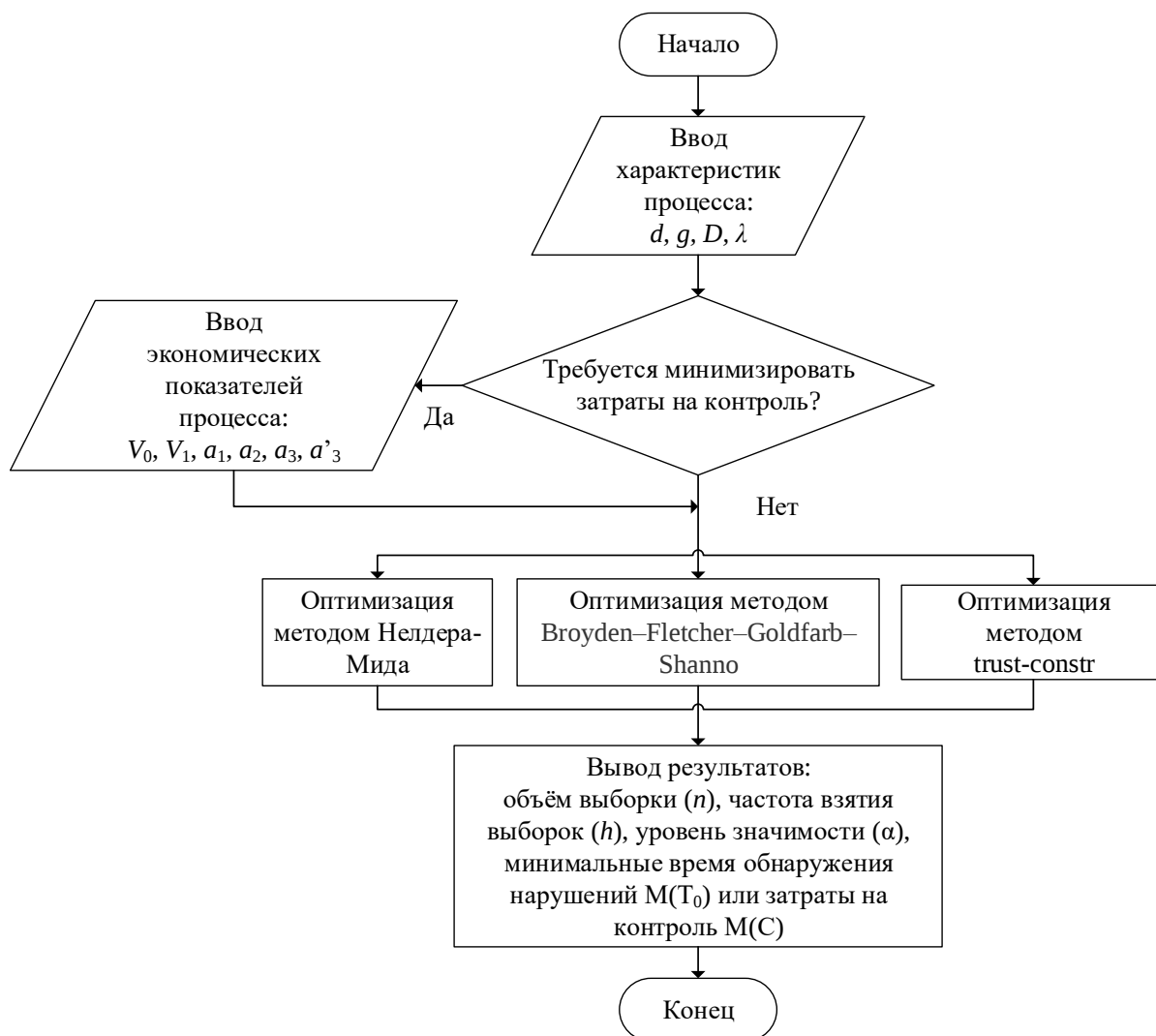


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма оптимизации параметров контроля

```
Интерпретатор Python
*** Python 3.7.7 (tags/v3.7.7:d7c567b08f, Mar 10 2020, 09:44:33) [MSC v.1900 32 bit (Intel)]
*** Удаленный Python engine is active ***
>>>
*** Удаленный интерпретатор инициализирован повторно***
1. Поиск локального минимума в доверительной области (trust-constr)
[5.e-01 5.e+00 1.e-04]
h= 0.5
n= 5
alfa = 0.0001
M(C) = 443.17

2. Метод от четверки Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (l-bfgs-b)
[4.e-01 3.e+00 1.e-04]
h= 0.4
n= 3
alfa = 0.0001
M(C) = 234.32

3. Недлер-Мид (nelder-mead)
[4.e-01 5.e+00 1.e-04]
h= 0.4
n= 3
alfa = 0.0001
M(C) = 234.32

>>>
```

Рисунок 7 – Результаты решения оптимизационной задачи

Разработанный комплекс программ обеспечивает повышение эффективности многомерного контроля рассеяния на основе алгоритма обобщенной дисперсии путем оптимизации параметров карты, которые задаются на этапе планирования контроля, а также различных модификаций алгоритма обобщенной дисперсии с оценкой их эффективности по результатам статистических испытаний.

В четвертой главе представлены результаты контроля показателей функционирования реальных технических объектов с применением разработанных методов.

Рассматривается процесс контроля стабильности вибраций гидроагрегата. Вибрационное состояние гидроагрегата оценивается по величине вибраций его конструкций и биения вала. Контролировались следующие вибрации: нижнего X_1 и верхнего X_3 генераторного подшипника верхнего бьефа и на правом берегу X_2 , X_4 , бой вала гидротурбины на нижнем бьефе X_5 и правом берегу X_6 , бой вала гидрогенератора X_7 , X_8 , а также вибрации крышки гидротурбины X_9 , X_{10} . Две взаимосвязанные пары показателей X_5 - X_7 и X_6 - X_8 необходимо контролировать методами многомерного контроля, в частности, средний уровень процесса – картой Хотеллинга, рассеяние процесса – картой обобщенной дисперсии. Карта обобщенной дисперсии, построенная для коррелированных показателей X_5 - X_7 на этапе анализа процесса, показала стабильность многомерного рассеяния. При мониторинге процесса для выявления нестабильности дополнительно

использовался поиск структур специального вида, в результате чего программа обнаружила тренд процесса.

В системе очистки воды Санкт-Петербургского водоканала контролировалось семь характеристик качества питьевой воды и шесть физико-химических характеристик источника «Западный Кронштадт». Для мониторинга многомерного рассеяния процесса применяется карта обобщенной дисперсии, но традиционный подход неприемлем для индивидуальных наблюдений. Поэтому для обнаружения нарушения многомерного рассеяния показателей качества процесса очистки воды применяется модификация алгоритма обобщенной дисперсии.

В течение определенного периода времени (учитывая, что показания снимаются один раз в сутки, этот определенный период времени может составлять, например, 30 дней) берется обучающая выборка контролируемых показателей качества воды. Для своевременного выявления нарушений, чтобы не допустить выхода показателей качества за границы допустимого, проводится статистический мониторинг.

При контроле группы трех коррелированных показателей «Цветность», «рН» и «Окисляемость» сбой процесса выявлен с помощью карты обобщенной дисперсии с предупреждающей границей для индивидуальных наблюдений, т.к. две точки подряд оказались между предупреждающей и контрольной границами.

Подобным образом проводился контроль стабильности технологического процесса производства теплоизоляционных плит. Для отработки методики контроля стабильности параметров прочности минераловатного утеплителя формируется обучающая выборка по двум коррелированным показателям: прочность при сжатии и модуль упругости. Параметры алгоритма обобщенной дисперсии оценивались путем решения оптимизационной задачи по минимизации стоимости контроля. Стоимость контроля при найденных значениях параметров: $n = 3$, $h = 0,4$, $\alpha = 0,0001$ - снизилась примерно на 30% по сравнению с контролем с экспертно заданными параметрами.

Для повышения эффективности алгоритма обобщенной дисперсии при мониторинге было осуществлено поиск структур специального вида на карте, что позволило в несколько раз снизить среднюю длину серий (с 11 выборок до одной, т.е. двукратное увеличение обобщенной дисперсии обнаруживается уже в следующем наблюдении).

Основные выводы

Полученные результаты позволяют считать, что поставленная цель работы – обеспечение стабильности функционирования сложных технических систем на основе более эффективных методов и алгоритмов контроля показателей ра-

боты этих систем по сравнению со стандартной картой обобщенной дисперсии – достигнута.

Основные результаты исследования:

- 1) Предложены методы и алгоритмы оптимизации параметров статистического контроля многомерного рассеяния показателей функционирования сложных технических систем на основе обобщенной дисперсии по двум критериям: минимизации времени до обнаружения нарушения и минимизации затрат, связанных с контролем; при этом затраты в рассмотренном примере контроля теплоизоляционных плит снижены на 30%.
- 2) Разработаны методы повышения эффективности контроля на основе алгоритма обобщенной дисперсии с использованием поиска структур специального вида на контрольной карте, применением предупреждающей границы и алгоритма экспоненциально взвешенных скользящих средних; проведенные статистические испытания показали, что эти методы обеспечивают снижение средней длины серий при различных типах нарушения в несколько раз: в рассмотренном примере средняя длина серий снизилась с 11 до одной выборки.
- 3) Разработанный алгоритм и программный комплекс статистического контроля коррелированных показателей функционирования сложных технических систем с применением предложенных методов может быть использован при решении практических задач мониторинга функционирования систем и обеспечивает поддержку принятия решений при нарушении стабильности в условиях эксплуатации.
- 4) Проведенное численное исследование функционирования реальных технических объектов (гидроагрегат, система водоочистки, процесс производства теплоизоляционных плит) показало повышение эффективности контроля многомерного рассеяния показателей, которое и обеспечивает стабильность функционирования технических систем: при обнаружении признаков нарушения производится корректировка процесса для исключения его нестабильности.

Направление дальнейшего совершенствования методов многомерного статистического контроля – это решение многокритериальных задач: найти параметры контроля, минимизируя как стоимость контроля, так и время на обнаружение нарушения; оптимизация контроля одновременно по алгоритму Хотеллинга и обобщенной дисперсии, и другие.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих работах:

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Алексеева А.В., Клячкин В.Н. Выбор параметров алгоритма обобщенной дисперсии при многомерном статистическом контроле рассеяния процесса // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. № 1 (99). С. 79-83.

2. Клячкин В.Н., Алексеева А.В. Оптимизация параметров алгоритма обобщенной дисперсии при статистическом контроле процесса // Автоматизация процессов управления. 2021. № 3 (61). С.41-47.
3. Алексеева А.В. Повышение эффективности статистического контроля многомерного рассеяния процесса // Автоматизация процессов управления. 2020. № 3 (61). С. 101-107.
4. Клячкин В.Н., Алексеева А.В. Исследование эффективности статистического контроля вибраций гидроагрегата // Автоматизация процессов управления. 2020. № 1 (59). С. 24-29.
5. Клячкин В.Н., Жуков Д.А., Алексеева А.В. Применение машинного обучения для вибродиагностики гидроагрегата // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 1. С. 1-5.
6. Клячкин В.Н., Алексеева А.В. Оценка стабильности функционирования гидроагрегата по результатам мониторинга вибраций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 3. С. 11-18.
7. Клячкин В.Н., Алексеева А.В. Оценка стабильности вибраций на основе алгоритма обобщенной дисперсии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4-3 (84). С. 491-493.
8. Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Иванова (Алексеева) А.В. Система статистического анализа и контроля стабильности вибраций гидроагрегата // Программные продукты и системы. 2018. № 3. С. 620-625.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus:

9. Alekseeva A., Karpunina I., Klyachkin V. Specific Features of Potable Water Purification Process// Journal of Physics: Conference Series, 1889(3), 2021. P. 32040.
10. Alekseeva A., Karpunina I., Klyachkin V. Detection of abnormalities during monitoring of potable water purification process // Proceedings of ITNT 2021 - 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology, 2021
11. Klyachkin V., Alekseeva A. Parameters optimization of the generalized dispersion algorithm // Proceedings of ITNT 2021 - 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology, 2021
12. Alekseeva A., Karpunina I., Klyachkin V. Analysis of Hydraulic Unit Operation Stability According to its Vibration Monitoring Results // CEUR Workshop Proceedings. "ITNT-DS 2020 - Proceedings of the 6th International Conference Information Technology and Nanotechnology. SessionDataScience" 2020. С. 46-49.

Свидетельства о регистрации программ:

13. Иванова А.В., Клячкин В.Н. Оценка стабильности вибраций гидроагрегата // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018611051.
14. Алексеев А.А., Иванова А.В., Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е. Анализ данных о вибрациях гидроагрегата // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018611066.

Публикации в других изданиях:

15. Алексеева А.В. Статистический контроль прочностных характеристик теплоизоляционных плит // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2021. № 3 (95). С. 27-30.
16. Клячкин В.Н., Алексеева А.В. Методы повышения эффективности алгоритма обобщенной дисперсии при контроле многомерного рассеяния // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Материалы III Международного форума. Санкт-Петербург, 2021. С. 135-136.
17. Алексеева А.В., Жуков Д.А., Клячкин В.Н., Санталов А.А. Применение агрегированных классификаторов при машинном обучении для оценки стабильности функционирования

- ния технических объектов // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли. М., 2020. С. 622-624.
- 18.Алексеева А.В. Поиск структур специального вида на карте обобщенной дисперсии как метод повышения эффективности контроля // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2020. № 2-3 (90-91). С. 20-23.
- 19.Алексеева А.В. Применение методов статистического контроля для диагностики виброустойчивости гидроагрегата // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2019. № 1 (85). С. 67-71.
- 20.Алексеева А.В., Клячкин В.Н. Программное обеспечение для контроля стабильности вибраций гидроагрегата // IT-Технологии: развитие и приложения. XV Ежегодная Международная научно-техническая конференция. Владикавказ, 2018. С. 134-141.
- 21.Иванова А.В., Клячкин В.Н. Использование алгоритмов многомерного контроля при вибромониторинге гидроагрегата // Перспективные информационные технологии. Труды Международной научно-технической конференции. Самарский научный центр РАН, 2018. С. 1007-1010.
- 22.Иванова А.В., Клячкин В.Н. Статистический анализ данных о вибрациях гидроагрегата // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. Материалы III научно-практической всероссийской конференции молодых ученых. Тольятти, 2017. С. 218-221.

Алексеева Анастасия Валерьевна

Методы и алгоритмы повышения эффективности контроля многомерного рассеяния показателей функционирования сложных технических систем

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать ____ . ____ . 2022. Формат 60х84/20.

Усл. печ. л. 1,40. Тираж 130 экз. Заказ ____.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, д.32.