

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 517.977

САИД
Жабраил Мусбах Али

**АНАЛИЗ ГРАНИЧНЫХ РЕЖИМОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ
МНОГОРЕЖИМНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Минск 2013

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

- Научный руководитель Лобаты́й Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета
- Официальные оппоненты: Кулаков Геннадий Тихонович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета
Стрижнев Александр Гаврилович, кандидат технических наук, доцент, начальник сектора СКБ-4 (Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП»)
- Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится 10 октября 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovets@bsuir.by, тел. (8-017) 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «09» сентября 2013 г.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В современных системах управления широко используются системы с переменной структурой (состояниями), которые имеют ограниченное число состояний, переходы в которых являются случайными, зависящими от времени и некоторых текущих фазовых координат процессов. Такие системы принято называть системами со случайной структурой, или мультиструктурными системами управления (МСУ). Исследованию таких систем посвящен ряд работ российских и белорусских учёных, среди которых в первую очередь следует отметить работы И.Е. Казакова, В.М. Артемьева, В.А. Бухалёва, В.А. Ганэ, И.М. Косачёва, А.А. Лобатого, В.А. Малкина.

Так как при рассмотрении технических объектов в ряде случаев под структурой понимают совокупность элементов системы, объединённых функциональными связями, то для однозначного толкования понятий будем называть структуру (состояние) системы режимом, а мультиструктурную систему управления (МСУ) – многорежимной системой управления (МPCУ).

К многорежимным системам управления можно отнести широко распространённые системы фазового управления (СФУ), для которых характерно несколько режимов работы, зависящих от влияния на них случайных скачкообразных воздействий и связанных с этим граничных режимов работы, при которых происходит переход СФУ в другое состояние (изменение структуры системы).

На кафедре систем управления БГУИР выполнен большой объём научных исследований, посвящённых решению научных задач и проблем, связанных с анализом и синтезом систем фазового управления, сложилась научная школа. В работах профессоров М.П. Батуры, А.П. Кузнецова, Л.Ю. Шилина и их учеников решены многие задачи исследования статистических и динамических свойств СФУ, повышения эффективности функционирования их элементов, разработаны и апробированы имитационные и аналитические модели СФУ. Однако развитие науки и техники, в первую очередь информационных технологий, ставит новые задачи, к которым, в частности, относится оптимальная обработка информации при наличии неопределённостей, оптимизация параметров, оценка и прогноз технического состояния СФУ.

В диссертации рассмотрены вопросы аналитического анализа граничных режимов и оптимизация многорежимной системы управления на основе теории динамических систем случайной структуры, предлагаются методы, позволяющие учитывать ряд специфических свойств МPCУ и решать прикладные задачи. Приводимые в диссертации методики и алгоритмы апробированы на известных математических моделях СФУ, учитывающих как динамические свойства систем, так и дискретный характер изменения их структуры.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема работы соответствует научному направлению кафедры систем управления учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Работа проводилась в рамках научно-исследовательской работы ГБ 06–2015 «Разработка методов анализа и синтеза, систем управления на основе современных технических средств и информационных технологий».

Цель и задачи исследований

Целью работы является разработка и исследование методов, алгоритмов аналитического анализа граничных режимов работы и оптимизации многорежимной системы управления применительно к системе фазового управления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ параметрических неопределённостей, оказывающих влияние на точность многорежимной системы управления на примере систем фазового управления, сформулировать требования, предъявляемые к ним.
2. Разработать метод аналитического определения интенсивностей смены состояния многорежимной системы управления.
3. Разработать методики и алгоритмы аналитической оценки характеристик надёжности многорежимной системы управления.
4. Разработать методы и алгоритмы оптимальной оценки состояния и идентификации параметров многорежимной системы управления.
5. Разработать методы и алгоритмы оптимизации параметров многорежимной системы управления.

Объектом исследования является многорежимная система управления, представленная аналитической математической моделью системы фазового управления.

Предметом исследования являются характеристики параметрических неопределённостей и граничных режимов работы элементов многорежимной системы управления, а также способы и алгоритмы, позволяющие повысить её точность.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика апостериорного вероятностного анализа многорежимной системы управления, позволяющая проводить оценку состояния МРСУ и определять допуски на параметры её элементов с учётом динамических и статистических свойств.

2. Методики и алгоритмы аналитической оценки и прогноза технического состояния МСУ с оценкой вероятностных характеристик смены состояний МСУ на основе аналитического моделирования граничных режимов работы системы.

3. Методика оптимизации параметров элементов МРСУ методом неградиентного случайного поиска при случайном характере их изменения.

Личный вклад соискателя

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены лично автором. Научный руководитель профессор А.А. Лобатый принимал участие в постановке задач, определении возможных путей их решения, предварительном анализе, обсуждении результатов исследований, проведённых автором. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками диссертационной работы

Автор самостоятельно получил основные результаты диссертационной работы. Общая концепция исследований и отдельные теоретические методы разработаны совместно с научным руководителем.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались на V международной конференции-форуме «Информационные системы и технологии» (Минск, 2009 г.), международной научно-технической конференции, посвящённой 45-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 2009 г.), IV международной научно-практической конференции «Научный потенциал молодёжи – будущему Беларуси» (Пинск, 2010 г.), 7, 8, 9-й международных научно-технических конференциях «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2009 – 2011 гг.). Результаты диссертации также докладывались на семинарах кафедры систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликованы 4 научные статьи в рецензируемых журналах согласно перечню ВАК Республики Беларусь общим объёмом 1,8 авторских листа и 8 тезисов докладов на научных конференциях. Количество и объём публикаций по теме диссертации соответствуют пункту 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Во введении определена область научных исследований, обоснована актуальность диссертационной работы, кратко проанализировано общее состояние научной задачи и основные пути её решения. В первой главе диссертации проведён анализ существующих и перспективных МРСУ на примере СФУ и случайных факторов, влияющих на их точность, анализ граничных режимов работы МРСУ. Во второй главе диссертации разработана методика апостериорного вероятностного анализа и определения допусков на параметры МРСУ. В третьей главе разработаны алгоритмы аналитической оценки и прогноза технического состояния МРСУ. В четвёртой главе разработаны алгоритмы параметрической идентификации и оптимизации МРСУ неградиентным случайным поиском.

Общий объём диссертации составляет 92 страницы, из них 84 страницы основного текста, 34 рисунка на 19 страницах, расположенных в тексте диссертации, библиографический список из 83 источников, включая 12 собственных публикаций автора, а также приложение на 1 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы, обоснована необходимость решения задач оценки технического состояния и оптимизации системы фазового управления при параметрических неопределённостях, приведены исследователи, достигшие научных результатов в этой области.

В **первой главе** рассматривается современное состояние изучаемого вопроса, определяется место и роль систем фазового управления, проведён анализ математических моделей МРСУ на примере СФУ.

Анализ СФУ как непрерывного, так и дискретного типа показывает, что для них характерно случайное скачкообразное изменение параметров, обусловленное наличием граничных режимов работ таких систем (режим биения, ре-

жими поиска и срыва синхронизма), действие на СФУ большого количества случайных факторов. Это позволяет отнести СФУ к классу динамических систем со случайной структурой и применять для анализа и синтеза СФУ соответствующую теорию.

Обобщённая структурная схема стохастической МРСУ применительно к СФУ представлена на рисунке 1, где обозначены основные возмущения, действующие на систему. Здесь $\xi_1(t)$ – аддитивная помеха случайного характера, налагающаяся на эталонный сигнал; $\xi_2(t)$ – низкочастотная помеха, на выходе фазового детектора; $\xi_3(t)$ – модулирующий сигнал при использовании системы ФАПЧ для стабилизации средней частот в частотном или фазовом модуляторе или паразитные сигналы, являющиеся результатом пульсации выпрямителя; $\xi_4(t)$ – дестабилизирующие факторы, обуславливающие нестабильность собственной частоты подстраиваемого автогенератора. К возмущениям относится также дискретное изменение структуры (состояния) СФУ ($s(t) = \overline{1, n}$).

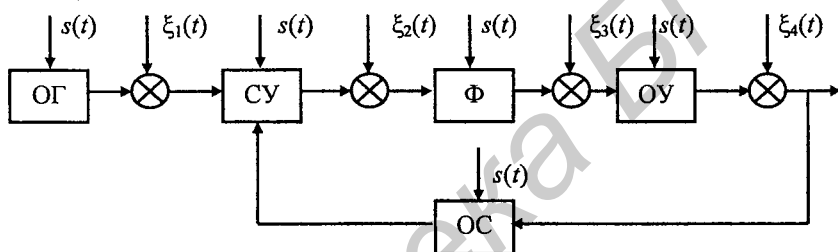


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема стохастической СФУ

На схеме обозначено: ОУ – объект управления (подстраиваемый генератор); ОС – устройства цепи обратной связи; СУ – сравнивающее устройство (фазовый детектор – ФД); Ф – фильтр; ОГ – опорный генератор.

Рассмотрение СФУ как динамической системы случайной структуры ставит ряд специфических задач, принципиально отличающихся от рассматриваемых известными учеными, и требует соответствующего математического аппарата.

Система случайной структуры, представленная на рисунке 1, в общем случае может быть описана векторно-матричным стохастическим уравнением вида

$$X^{(s)}(t) = D(t)\varphi^{(s)}(X, t) + W^{(s)}(X, t)U(t) + H^{(s)}(X, t)\xi(t), X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где $\dot{X}^{(s)}(t)$ – в общем случае n -мерный случайный вектор (матрица-столбец); $D(t)$ – матрица порядка $n \times n$ детерминированных параметров с компонентами

d_k ; $\varphi^{(s)}(X, t)$ – векторная; $W^{(s)}(X, t)$, $H^{(s)}(X, t)$ – матричные нелинейные функции; $U(t)$ – r -мерная ($r < n$) векторная функция управления; $\xi(t)$ – n -мерный вектор центрированного гауссова белого шума с положительно-определенной матрицей интенсивностей $G(t)$ и матрицей корреляционных функций $K_\xi(t, t') = G(t)\delta(t - t')$, $S(t) = \{s, t\}$ – индекс структуры системы.

Для каждой подсистемы МРСУ марковскому процессу, описываемому уравнением (1), соответствует обобщенное уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова относительно плотности вероятности $f_i^{(s)}(X_i, t)$ не поглощенных реализаций s -й структуры.

Проведен анализ граничных режимов работы СФУ. Обосновано, что количественную оценку явления срыва синхронизма целесообразно проводить на основе рассмотрения нестационарной плотности распределения вероятности фазового рассогласования. При этом пределы интегрирования вектора фазовых координат СФУ по величине фазового рассогласования φ представляют собой границы апертуры φ_{\min} и φ_{\max} . Инерционность перехода МРСУ из одного состояния в другое приблизительно охарактеризована минимальным интервалом времени τ_n пребывания сигнала в некоторой области, необходимым для перехода системы в другое состояние, что при вероятностном анализе смены режима их работы позволяет более полно учесть их реальные физические свойства. При этом вероятность смены структуры системой $P_n(t)$ (перехода в другое состояние) вычисляется по рекуррентной формуле:

$$P_n(t_r) = 1 - \prod_{i=1}^r \{1 - P_{ni}(t_i)\}, \quad (2)$$

где $P_n(t_i)$ – вероятность смены структуры системой на i -м интервале в течение времени τ_n , характеризующего инерционность системы.

Во второй главе проводится обоснование требований к характеристикам системы фазового управления на основе вероятностного анализа. Предложена методика вероятностного анализа граничных режимов работы МРСУ.

Задачу оптимального оценивания (фильтрации) фазовых координат МРСУ предполагается решать на основе использования результатов измерений и априорной информации о математической модели оцениваемого процесса. При этом решается задача вероятностного анализа наблюдаемой МРСУ.

Рассматривается распространённый тип МРСУ – система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), для которой определяется математическая модель фильтра МРСУ, обеспечивающего оптимальное оценивание (сглаживание) сигнала с выхода фазового детектора, и на основе этой модели определяется апостериорная вероятность захвата сигнала поисковой системой ФАПЧ.

Все элементы СФУ, кроме фазового детектора и фильтра, описываются стохастическими дифференциальными уравнениями в форме Ланжевена. Полной вероятностной характеристикой $\varphi(t)$ по результатам наблюдения на интервале является апостериорная плотность распределения вероятности $\hat{f}(\varphi, t) = f(\varphi, t|Z, \tau)$. Для апостериорного вероятностного анализа ФАПЧ использована теория динамических систем случайной структуры. Для этого будем рассматривать три области, в которых может находиться процесс $\varphi(t)$, как три состояния (случайные структуры) (рисунок 2).

Эволюция оценки $\hat{\varphi}(t)$ с учетом перехода её через границы области $U_\varphi = [\alpha, \beta]$ описывается обобщенным уравнением Стратоновича – Кушнера для l -й структуры, которое в нашей задаче при $l = \overline{1,3}$ имеет вид

$$\frac{\partial \hat{f}(\varphi, l, t)}{\partial t} = -\frac{\partial \hat{\pi}(\varphi, l, t)}{\partial \varphi} - \sum_{r=1}^3 [\hat{\nu}_{\alpha r}(\varphi, t) - \hat{u}_{rl}(\varphi, t)] - \frac{1}{2} \left[\rho(\varphi, z, t) - \sum_{k=1}^3 \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\varphi, z, t) \hat{f}(\varphi, k, t) d\varphi \right] \cdot \hat{f}(\varphi, l, t) \quad (3)$$

при начальных условиях $\hat{f}(\varphi, l, t_0) = f(\varphi, t_0)$. Здесь $\hat{\pi}(\varphi, l, t)$ – оценка плотности потока вероятности l -й структуры; $\hat{\nu}_{lr}$ – оценка интенсивности перехода реализации процесса φ из области l в область r (интенсивность поглощения реализаций структуры l); γ_{lr} – граница областей l и r , δ – дельта-функция; $\hat{u}_{rl}(\varphi, t)$ – оценка интенсивности возврата реализаций процесса из области r в область l (интенсивность восстановления реализацией структуры l); $\rho(\varphi, z, t)$ – функция невязки, которая при допущении о нормальности и некоррелированности шумов процесса и измерителя определяются известными выражениями из теории фильтрации.

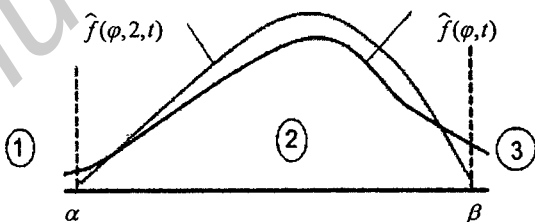


Рисунок 2 – Эволюция плотности распределения вероятности

Методика апостериорной оценки вероятностных характеристик МРСУ основана на том, что апостериорная плотность вероятности фазовой координаты φ считается гауссовой. На основе этого получены апостериорные уравнения

для оценок математического ожидания $\hat{\varphi}(2,t) = \hat{\varphi}_2$ и дисперсии $D_{\varphi}(2,t) = D_2$, позволяющие производить апостериорный вероятностный анализ процесса перехода СФУ из режима поиска в режим автосопровождения сигнала на основе использования выражения (1).

Вероятность захвата сигнала $\varphi(t)$ поисковой системы МРСУ на примере ФАПЧ определим как вероятность того, что $\varphi(t)$ попадает в область захвата U_{φ} и не выйдет из U_{φ} в течение заданного времени τ_{zx} , необходимого для устойчивого захвата. Рассмотрим задачу определения апостериорной вероятности захвата сигнала $\varphi(t)$ $\hat{P}_{zx}(t_r)$ на основе измерений по формуле [1-А]

$$\hat{P}_{zx}(t_r) = 1 - \prod_{i=1}^r \left\{ 1 - \hat{P}_1(t_i) \hat{P}_2(t_i + \tau_{zx} | \varphi(t_i) \in U_{\varphi}) \right\}, \quad (4)$$

где $\hat{P}_1(t_i)$ – оценка вероятности нахождения времени в области $\varphi(t)$ в i -й момент времени в области U_{φ} ; $\hat{P}_2(t_i + \tau_{zx} | \varphi(t_i) \in U_{\varphi})$ – оценка вероятности невыхода $\varphi(t)$ из области U_{φ} (не достижения границ области U_{φ}) к моменту времени $t_i + \tau_{zx}$ при условии, что в момент t_i процесс $\varphi(t)$ находился в U_{φ} .

Для определения \hat{P}_2 необходимо рассматривать плотность распределения вероятности непоглощенных реализаций $\hat{f}(\varphi, 2, t)$ $\varphi(t)$, находящихся внутри области U_{φ} (рисунок 2) при $U_r = 0$ ($r=1,3$), и интегрировать уравнение (2) по φ в бесконечных пределах.

Так как в реальных системах ФАПЧ имеет место большее отношение сигнал/шум, то есть основание считать апостериорную плотность вероятности фазовой координаты φ гауссовой. Гауссово приближение дает возможность построить сравнительно простой алгоритм нелинейной фильтрации, основанной на двухмоментной аппроксимации плотности вероятности.

Значения $\hat{P}_{zx}(t_r)$, соединённые интерполяционной линией $\hat{P}_{zx}(t)$, представлены в виде графика на рисунке 3.

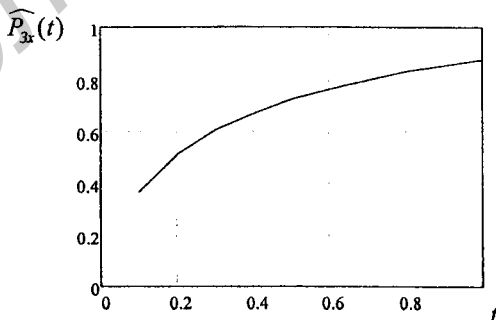


Рисунок 3 – График зависимости $\hat{P}_{zx}(t)$

На основе разработанной методики апостериорного вероятностного анализа МСУ предложена методика определения допусков на параметры МРСУ.

В качестве обобщённого критерия эффективности МРСУ рассматривается заданная вероятность захвата сигнала (перехода в режим синхронизации) $P_{\text{зх}} = P_{\text{зад}}$ в течение времени $t_{\text{зад}} = t_k - t_0$. Так как в прямой постановке такая задача однозначного решения не имеет, то для решения данной задачи предлагается ввести дополнительную минимизируемую функцию, в качестве которой целесообразно рассматривать функцию стоимости системы. При этом зависимость стоимости i -го элемента сложной системы C_i от величины поля допуска его параметров d_i в общем виде обозначается как $C_i = C_i(d_i)$.

При исследовании независимого влияния различных параметров МРСУ на вероятность захвата решением прямой задачи вероятностного анализа получаются зависимости $P_j(d_j)$. Задача определения допусков решается путём введения обобщённой функции Лагранжа $L(D, P)$ и поиска её условного экстремума при вероятностных ограничениях в виде задаваемых допустимых значений вероятности захвата $P_{j\text{зад}} (P_j(d_j) \leq P_{j\text{зад}}, j = \overline{1, m})$.

В качестве примера рассмотрено определение допуска на величину допустимых инструментальных ошибок (погрешностей) одного из элементов МРСУ, для которого заданы математические модели стоимостных и надёжных характеристик.

Предложенная методика является одним из решений известных задач определения допусков на параметры системы по стоимостному критерию. Отличие данного подхода заключается в том, что для определения допусков необходимо вначале решить прямую задачу вероятностного анализа по методике, разработанной в данной диссертации.

Третья глава посвящена разработке методики аналитической оценки и прогноза состояния МРСУ. Проведено обоснование аналитических методов диагностики отказов, прогноз технического состояния на основе анализа граничных режимов работы при неопределённости исходной информации. Так как число возможных отказов технических МРСУ конечно, то и число состояний структуры динамической системы будет конечным.

Функционирование МРСУ в процессе контроля описывается стохастическими разностными уравнениями с аддитивными дискретными шумами. Для определения вероятности l -й структуры (состояния) МРСУ использован байесовский алгоритм определения апостериорной вероятности состояния системы при допущении того, что в процессе контроля переход из одной структуры в другую практически невозможен (маловероятен) и априорная вероятность на k -м шаге равна апостериорной вероятности на предыдущем шаге.

Для проверки работоспособности разработанного алгоритма диагностирования была использована известная математическая модель СФУ. Рассматривались две возможные структуры (состояния) системы: система исправна (все параметры равны номинальным) и система неисправна (в результате неблагоприятных воздействий параметры претерпели изменения). Анализ результатов моделирования показал, что используемые алгоритмы диагностики позволяют с высокой степенью достоверности определить структуру (состояние), в которой находится СФУ за ограниченное время.

Разработана методика аналитической оценки характеристик граничных режимов работы МРСУ на основе математических моделей процессов, происходящих в элементах МРСУ и описываемых уравнениями типа (1).

Для определения интенсивностей смены состояний (структур) МРСУ $v_{lr}(t)$ использовано эргодическое свойство случайных процессов $x(t)$ в элементах МРСУ, переход которых из состояния l в состояние (структуру) r проявляется в превышении реализацией $x(t)$ некоторого допустимого уровня Δ , называемого выбросом случайного процесса $x(t)$. В установившемся режиме интенсивность выбросов определяется по формуле

$$v_{\Delta}(T) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_{\dot{x}}}{D_x}} \exp\left(-\frac{\Delta^2}{2D_x}\right). \quad (5)$$

Дисперсии D_x и $D_{\dot{x}}$ случайных процессов $x(t)$ и $\dot{x}(t)$ определяются путём решения уравнений для вероятностных моментов МРСУ.

На основе использования полученных аналитически интенсивностей смены состояний элементов МРСУ проведён анализ надёжности МРСУ на примере СФУ с помощью топологических уравнений. Введён в рассмотрение вектор (матрица-столбец), состоящий из вероятностей $P_i^{(s)}$ ($i = 1, nv, s = 1, ns$) нахождения i -х элементов СФУ в s -м состоянии, считая, что все подсистемы имеют одинаковое число состояний [4-А] $P^{(s)T}(t) = [P_1^{(s)}(t), \dots, P_i^{(s)}(t), \dots, P_{nv}^{(s)}(t)]$. Вероятности состояний элементов МРСУ зависят от нормированных потоков поглощения реализаций, связанных между собой топологическим векторно-матричным уравнением вида

$$\dot{P}^{(s)}(t) = -P^{(s)}(t) \left\{ \sum_{r=1(r \neq s)}^{ns} [V_0^{(sr)}(t) + V^T V^{(sr)}(t) - \tilde{A} \mu^{(sr)}(t)] \right\}, \quad (6)$$

где $V_0^{(sr)}$, $V^{(sr)}$, $\mu^{(sr)}$ — соответственно векторы интенсивностей смены состояний элементов СФУ и каналов связи между ними; V^T — транспонированная

матрица смежности системы; \tilde{A} – матрица, получаемая из матрицы инцидентности системы заменой всех положительных элементов нулями.

В качестве примера рассмотрена модель СФУ, представленная структурной схемой на рисунке 4.

На рисунке 4 обозначено: 1 и 8 – дискриминаторы; 2 и 9 – фильтры нижних частот; 3 и 10 – управляемые генераторы; 4 и 11 – делители частоты с переменным коэффициентом деления; 5 и 12 – смесители; 6 – опорный генератор; 7 – датчик опорных частот. Подробное описание работы данной СФУ рассмотрено в [9, 40]. Выходной сигнал СФУ и входные сигналы задаваемых коэффициентов деления на данном рисунке не рассматриваются. Курсивом на рисунке 4 обозначены m номеров связей между элементами системы ($m = 1, 15$).

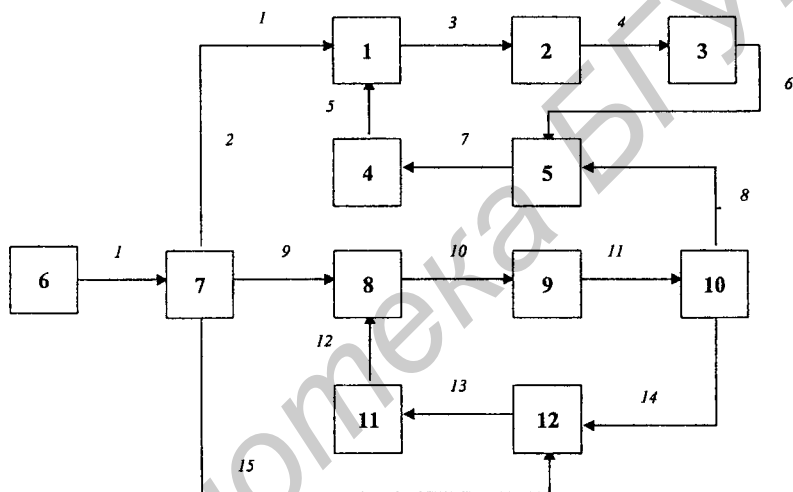


Рисунок 4 – Структурная схема многорежимной системы управления

Рассматриваются два состояния элементов системы: работоспособное и неработоспособное. На рисунке 5 представлены графики изменения вероятностей работоспособных состояний некоторых подсистем СФУ (номер параметра соответствует номеру подсистемы). При этом на одних графиках изображены значения вероятностей без учёта топологии системы и с её учётом (с индексом «t») при заданных интенсивностях переходов.

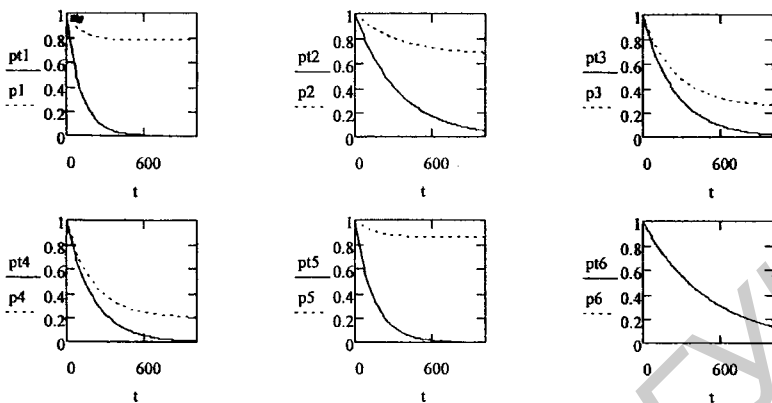


Рисунок 5 – Вероятности работоспособных состояний подсистем

Четвёртая глава посвящена идентификации и оптимизации параметров элементов MPCУ. Рассматривается математическая модель MPCУ, описываемая векторно-матричным уравнением в форме Ланжевена со случайными параметрами

$$\dot{X}^{(s)}(t) = \varphi(X, D, s, t) + \sigma(X, D, s, t)U(t) + H(X, D, s, t)\xi(t) \quad (7)$$

при начальных условиях $X^{(s)}(t_0) = X_0$, $s = \overline{1, n_s}$. В данном случае $D = D^{(s)}(t)$ – блочный nv -мерный вектор в общем случае случайных параметров СФУ. $D^{(s)T}(t) = [D_1^{(s)}(t), \dots, D_i^{(s)}(t), \dots, D_{nv}^{(s)}(t)]$, $D_i^{(s)}(t)$ – вектор параметров i -го элемента (подсистемы) СФУ. Предполагается, что в результате проведения идентификационных экспериментов (натурных или моделированием) получены множества функций фазовых координат, управлений и измерений: $X_v(t)$, $U_v(t)$, $Z_v(t)$. Задача идентификации состоит в том, чтобы на основе $X_v(t)$, $U_v(t)$ и $Z_v(t)$ определить значение вектора параметров $\widehat{D}^{(s)}(t)$, при котором разность $\Delta D^{(s)}(t) = D^{(s)}(t) - \widehat{D}^{(s)}(t)$ принимает наименьшее значение. На интервале наблюдения $[t_0, t]$ вектор $D^{(s)}(t)$ представим в виде

$$D^{(s)}(t) = D_n(t) + d^{(s)}(t), \quad (8)$$

где $d^{(s)}(t)$ – вектор малых отклонений параметров системы размерности n_d .

Компоненты вектора $d(t)$ описываются уравнением типа формирующего фильтра. Для каждого i -го элемента MPCУ введен расширенный вектор состояний $X_p^{(s)T}(t) = [X^{(s)}(t), d^{(s)}(t)]$. Для случая неизменного состояния (структуры), а также линейных уравнений объекта и измерителя алгоритм идентификации принимает вид фильтра Калмана.

В качестве примера рассмотрен процесс идентификации параметров непрерывной линейной части (НЛЧ) СФУ, описываемой соответствующим уравнением. Математическое моделирование данного примера идентификации параметров МРСУ производилось в среде Mathcad. Рассматривалась гипотетическая СФУ с заданными параметрами НЛЧ. Результаты моделирования показали работоспособность алгоритма идентификации. Расхождения в оценке параметров элементов СФУ незначительны. Несмотря на то что исследования проводились при использовании математической модели гипотетической СФУ, представленный алгоритм параметрической идентификации применим для реализации в реальных МС.

Так как СФУ представляет собой многорежимную систему, то изменения вектора параметров $D(t)$ носят случайный характер и зависят от случайных моментов времени. Для оптимизации такой системы проведена её рандомизация путём введения непрерывного вектора вероятностей $P^T(D) = [P_1(s=1), \dots, P_{ns}(s=s_{ns})]$, в котором $P_k = P\{D(S, t) = D_k\}$; $D(S, t)$ – случайный вектор (матрица-столбец) параметров системы, зависящий от номера структуры s и текущего времени t ; ns – количество возможных структур системы; D_k – фиксированный вектор параметров системы, имеющий вероятность существования P_k . Минимизируемый функционал качества $\bar{J}(D, P, t)$ при s -й структуре (состоянии) системы рассматривается в виде

$$\bar{J}(D, P, t) = \sum_{s=1}^{ns} [J(D, S, t) P^{(s)}(t)], \quad (9)$$

где $P^{(s)}(t)$ – вероятность s -й структуры системы.

В процессе оптимизации параметров элементов МРСУ определяются оптимальные значения вектора параметров D_{opt} , обеспечивающие минимум заданного функционала качества (10). Введем в рассмотрение событие Ξ , заключающееся в том, что при заданном входном сигнале МРСУ X выходной сигнал Y удовлетворяет требованию близости к требуемому значению Y_T , и выполняются все ограничения, наложенные на систему. Это означает, что величина фазового рассогласования φ не выходит за границы области срыва синхронизма. Противоположное событие $\bar{\Xi}$ состоит в том, что не выполняется требование близости Y к Y_T или не выполняется хотя бы одно из ограничений, наложенных на систему. Если матрицу параметров оптимальной системы обозначить через $U_0 = U_0(D_{opt})$, то

$$P(\Xi|U_0) = \max_{U_{cd}} P(\Xi|U_{cd}). \quad (10)$$

При такой постановке задачи управляющая матрица системы имеет вид $U_{cd}^T = [D_1 \dots D_{nd}]$. Необходимо определить $U_{cd} = U_0$, такое, при котором достигается максимум вероятности события Ξ .

На рисунке 6 показана общая схема неградиентного случайного поиска с адаптацией, предназначенного для оптимизации параметров МРСУ. Если событие Ξ имеет место, то ключ K_1 открывается и в блок U_0 поступает вектор U_{cD} , обеспечивающий свершение события Ξ . В блоке D_0 формируются вероятностные характеристики события ($U_{cD}|\Xi$), называемые апостериорными. Блоки $L_D(n+1)$ и $P_{\Xi}(n)$ в данном случае представляют собой оператор адаптации, который корректирует априорные значения U_{cD} в соответствии с априорными и апостериорными вероятностями события Ξ . Потребное количество сеансов поиска N_0 определяется требуемой точностью решения задачи и определяется известными выражениями прикладной математики. Поиск оптимальных значений параметров системы завершается на основе использования известных формул математической статистики для доверительных вероятностей.

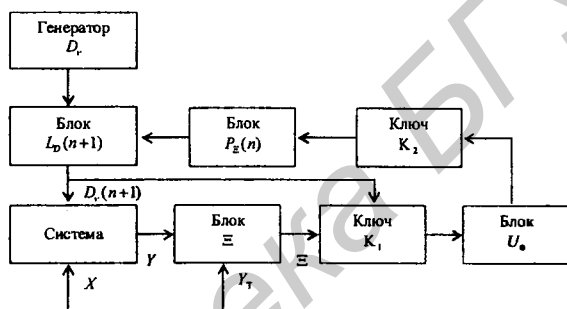


Рисунок 6 – Структурная схема неградиентного случайного поиска параметров МРСУ

На рисунке 7 представлены результаты исследования работоспособности предложенной методики путём математического моделирования оптимизации параметров фильтра СФУ. Случайные реализации иллюстрируют работу изложенного выше алгоритма параметрического неградиентного случайного поиска при различных априорных случайных значениях вектора параметров $U_D^T = [a \ b]$.

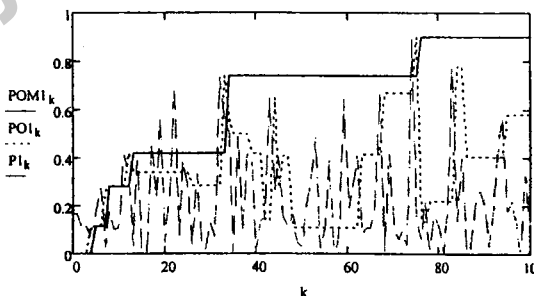


Рисунок 7 – Реализации вероятностей параметрической оптимизации

На рисунке 7 обозначено: $P1_k$ – значения априорной вероятности выбора ν -го вектора параметров СФУ; $PO1_k$ – апостериорные вероятности события Ξ , поступающие в блок U_0 с выхода ключа K_1 ; $POM1_k$ – максимальные значения апостериорных вероятностей выбора оптимального вектора параметров СФУ, вычисленные в блоке U_0 . Индекс « k » означает номер шага поиска. Дискретные значения вероятностей на приведённых рисунках для наглядности соединены прямыми линиями. Количество шагов поиска, необходимое для определения оптимальных параметров системы, является случайным. Значение вероятности определения искомого вектора параметров СФУ превышает заданное значение $P_{\text{зад}}$. Для $P_{\text{зад}}=0,8$ число шагов поиска составило в среднем около 60.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведённый анализ сложных многорежимных систем управления на примере основных структурных схем систем фазового управления и их математических моделей выявил общие закономерности в их формализации. Характер неопределённостей СФУ и случайных процессов, протекающих в системе, позволил обосновать использование математической модели СФУ в классе динамических систем случайной структуры в виде векторно-матричного стохастического уравнения разрывного типа. Обосновано, что при решении задач вероятностного анализа СФУ необходимо учитывать инерционность СФУ при переходе из режима биений в режим синхронизации, которая может быть приближенно охарактеризована минимальным интервалом времени, необходимым для перехода системы в другое состояние [1–А, 5–А].

2. Разработанная методика определения апостериорной вероятности захвата и беспрерывного автосопровождения сигнала МРСУ позволяет производить аналитическое исследование существующих и перспективных МРСУ на этапе предварительного проектирования, учитывая как их динамические свойства, так и вероятностные характеристики, необходимые для определения допусков на параметры системы по критерию минимума стоимости допуска при вероятностных ограничениях на заданное качество функционирования системы [1–А].

3. Полученные априорно математические модели процессов, происходящих в МРСУ, при использовании методов теории динамических систем случайной структуры дают возможность оценить техническое состояние МРСУ путём применения разработанного алгоритма технической диагностики отказов СФУ, построенного на основе байесовского рекуррентного алгоритма определения апостериорной вероятности состояния системы [1–А, 2–А, 7–А].

4. Предложенная методика аналитической оценки характеристик граничных режимов работы МРСУ позволяет на основе экспериментально или аналитически определённых значений эксплуатационных параметров элементов МРСУ определить диапазон работоспособности и вероятностные характеристики, необходимые для оценки топологических свойств системы (взаимного влияния подсистем). При этом математическая модель МРСУ должна включать в себя совокупность топологических уравнений, составленных на основе теории графов, и совокупность компонентных уравнений подсистем, в качестве которых целесообразно использовать дифференциальные уравнения разрывного типа в векторно-матричной форме [4–А, 7–А, 8–А, 9–А, 10–А].

5. Обоснована целесообразность использования неградиентного случайного поиска для оптимизации МРСУ, так как в условиях наличия структурных и параметрических неопределённостей множество локальных экстремумов функционала качества затрудняет решать задачу оптимизации. При этом в качестве критерия целесообразно рассматривать событие, заключающееся в том, что при заданном входном сигнале выходной сигнал удовлетворяет требованию близости к требуемому значению, и выполняются все ограничения, наложенные на систему. Математическое моделирование разработанного алгоритма параметрической оптимизации элементов МРСУ показало его работоспособность [3–А, 11–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученную в диссертационной работе совокупность научных результатов можно квалифицировать как возможное направление в области задач аналитического исследования МРСУ применительно к решению вопросов вероятностного анализа, направленных на определение оптимальных эксплуатационных характеристик по различным критериям качества, в том числе применительно к СФУ.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы в организациях, занимающихся вопросами анализа и синтеза систем автоматического управления техническими объектами, а также в учебном процессе учреждений образования Республики Беларусь и Ливии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных рецензируемых журналах

1—А. Саид, Ж.М. Апостериорный вероятностный анализ системы фазового управления / А.А. Лобатый, В.Л. Бусько, М.В. Почебут, Ж.М. Саид // Информатика. — 2009. — № 3 (23). — С. 91–99.

2—А. Саид, Ж.М. Аналитическое моделирование граничных режимов работы стохастической системы / А.А. Лобатый, Ж.М. Саид // Доклады БГУИР. — 2009. — № 4 (42). — С. 17–23.

3—А. Саид, Ж.М. Оптимизация топологической структуры нейронной сети не градиентным случайным поиском / А.А. Лобатый, Ж.М. Саид // Сборник научных статей Военной академии Респ. Беларусь. — 2010. — № 18. — С. 110–116.

4—А. Саид, Ж.М. Анализ надёжности сложной системы с помощью топологических уравнений / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас, Ж.М. Саид // Доклады БГУИР. — 2011. — № 2 (56). — С. 90–95.

Тезисы докладов на научных конференциях

5—А. Саид, Ж.М. Вероятностный анализ наблюдаемой системы фазового управления». / А.А. Лобатый, Ж.М. Саид // Междунар. науч.-техн. конф., посв. 45-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 19 марта 2009 г.): тез. докл. — Минск, 2009. — С. 131.

6—А. Саид, Ж.М. Параметрическая оптимизация системы управления не градиентным случайным поиском / А.А. Лобатый, Ж.М. Саид // Информационные системы и технологии: материалы V Международной конференции-форума (16–17 нояб. 2009 г.). — Минск, 2009. — С. 211–212.

7—А. Саид, Ж.М. Оценка состояния системы фазового управления / Ж.М. Саид // Материалы VII междунар. науч.-техн. конф. БНТУ, Минск, 16 марта 2009 г. — Минск, 2009. — С. 164.

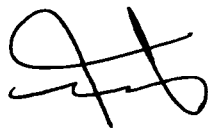
8—А. Саид, Ж.М. Моделирование граничных режимов работы системы / Ж.М. Саид // Материалы IV Междунар. молодёж. науч.-практ. конф., Пинск, 9 апр. 2010 г. — Пинск, 2010. — С. 206.

9—А. Саид, Ж.М. Оценка взаимного влияния подсистем сложной системы / Ю.Ф. Икуас, Ж.М. Саид // Материалы республ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 15–17 марта 2010 г. — Гомель, 2010. — С. 22–23.

10—А. Саид, Ж.М. Топологические уравнения для вероятностей состояний / Ю.Ф. Икуас, Ж.М. Саид // Материалы VIII междунар. науч.-техн. конф. БНТУ, 8–10 апр. 2010 г., Минск. — Минск, 2010. — С. 236.

11–А. Саид, Ж.М. Алгоритм неградиентного случайного поиска при оптимизации топологии системы / Ж.М. Саид // Материалы VIII междунар. науч.-техн. конф. БНТУ, Минск, 8–10 апр. 2010 г. – Минск, 2010. – С. 251.

12–А. Саид, Ж.М. Оценка состояния подсистем сложной динамической системы / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас, Ж.М. Саид // Материалы IX междунар. науч.-техн. конф. БНТУ, Минск. – Минск, 2011. – С. 231.



Библиотека БГУИР

РЭЗІЮМЭ

Саід Жабраіл Мусбах Алі

Аналіз гранічных рэжымаў і аптымізацыя многарэжымнай сістэмы кіравання

Ключавыя словы: многарэжымная сістэма фазавага кіравання, імавернасны аналіз, аптымізацыя параметраў.

Мэта працы – распрацоўка і даследванне метадаў і алгарытмаў аналітычнага аналіза гранічных рэжымаў і аптымізацыя многарэжымнай сістэмы кіравання ў дачыненні да сістэмы фазавага кіравання.

Аб'ект даследвання – многарэжымная сістэма кіравання, прадстаўленая аналітычнай матэматычнай мадэллю сістэмы фазавага кіравання. Прадметам даследвання з'яўляюцца характэрыстыкі параметрычных ненадакладнасцяў і гранічных рэжымаў работы элементаў многарэжымнай сістэмы, а таксама спосабы і алгарытмы, дазваляючыя павысіць яе дакладнасць.

Распрацавана метадыка вызначэння апастарыёрнай імавернасці захопа і безрыўнага аўтасуправаджэння сігнала многарэжымнай сістэмы кіравання, дазваляючая праводзіць аналітычнае даследванне сістэмы на этапе папярэдняга праектавання, ўлічваючы асноўныя свойствы, а таксама дэтэрмініраваныя і стахастычныя характэрыстыкі, неабходныя для вызначэння дапускоў на параметры сістэмы на падставе рашэння прамой задачы імавернаснага аналіза па крытэрыю мінімуму вартасці допуску пры імавернасных абмежаваннях на заданую якасць функцыянавання сістэмы.

Прапанаваная метадыка аналітычнай ацэнкі характэрыстык гранічных рэжымаў работы многарэжымнай сістэмы кіравання дазваляе на падставе эксперыментальна ці аналітычна вызначаных статыстычных характэрыстыках даследуемага працэса і зададзеных эксплуатацыйных параметрах элементаў сістэмы, схільным выпадковым уздзеянням, вызначыць дыяпазон яе працаздольнасці і імавернасныя характэрыстыкі. Рэалізацыя распрацаваных на падставе прапанаванай метадыкі алгарытмаў кантроля тэхнічнага стану сістэмы дазваляе атрымаць больш поўную інфармацыю аб ступені ўзаемнага ўплыву падсістэм.

Выкарыстаны неградыентны выпадковы пошук для аптымізацыі многарэжымнай сістэмы кіравання ва ўмовах наяўнасці структурных і параметрычных надакладнасцей. У якасці крытэрыя аптымізацыі разглядаецца падзея, якая заключаецца ў тым, што пры зададзеным уваходным сігнале выходны сігнал задавальняе патрабуемаму значэнню і выконваюцца ўсе абмежаванні, накладзеныя на сістэму.

Галіна ўжывання: тэхнічная кібернэтыка.

РЕЗЮМЕ

Саид Жабраил Мусбах Али

Анализ граничных режимов и оптимизация многорежимной системы управления

Ключевые слова: многорежимная система фазового управления, вероятностный анализ, оптимизация параметров.

Цель работы: разработка и исследование методов, алгоритмов аналитического анализа граничных режимов работы и оптимизации многорежимной системы управления применительно к системе фазового управления.

Объект исследования: многорежимная система управления, представленная аналитической математической моделью системы фазового управления. Предметом исследования являются характеристики параметрических неопределённостей и граничных режимов работы элементов многорежимной системы управления, а также способы и алгоритмы, позволяющие повысить её точность.

Полученные результаты и их новизна: разработана методика определения апостериорной вероятности захвата и бесрывного автосопровождения сигнала многорежимной системы управления, позволяющая производить аналитическое исследование системы на этапе предварительного проектирования, учитывая основные свойства, а также детерминированные и стохастические характеристики, необходимые для определения допусков на параметры системы на основе решения прямой задачи вероятностного анализа по критерию минимума стоимости допуска при вероятностных ограничениях на заданное качество функционирования системы.

Предложенная методика аналитической оценки характеристик граничных режимов работы многорежимной системы управления позволяет на основе экспериментально или аналитически определённых статистических характеристик исследуемого процесса и заданных эксплуатационных параметров элементов системы, подверженным случайным воздействиям, определить диапазон её работоспособности и вероятностные характеристики. Реализация разработанных на основе предложенной методики алгоритмов контроля технического состояния системы позволяет получить более полную информацию о степени взаимного влияния подсистем.

Использован неградиентный случайный поиск для оптимизации многорежимной системы управления в условиях наличия структурных и параметрических неопределённостей. В качестве критерия оптимизации рассматривается событие, заключающееся в том, что при заданном входном сигнале выходной сигнал удовлетворяет требованию близости к требуемому значению и выполняются все ограничения, наложенные на систему.

Область применения: техническая кибернетика.

SUMMARY

Said Jabrail Musbah Ali

The analysis of boundary modes and optimisation of the multimodes control systems

Keywords: multimodes system of phase management, the likelihood analysis, optimisation of parametres.

The work purpose is working out and research of methods, algorithms of the analytical analysis of boundary operating modes and optimisation of a multimodes control system with reference to system of phase management.

Object of research is the multimodes control system presented by analytical mathematical model of system of phase management. An object of research are characteristics parametrical indefinitenesses and boundary operating modes of elements of a multimodes control system, and also ways and algorithms allowing to raise its accuracy.

The definition technique a posteriori probabilities of capture and the continuous autosupports of a signal of the multimodes control system is developed, allowing to make analytical research of system at a stage of preliminary designing, considering the basic properties, and also the determined and stochastic characteristics necessary for definition of admissions on parametres of system on the basis of the decision of a direct problem of the likelihood analysis by criterion of a minimum of cost of the admission at likelihood restrictions on set quality of functioning of system.

The offered technique of an analytical estimation of characteristics of boundary operating modes of a multimodes control system allows on a basis experimentally or analytically certain statistical characteristics of investigated process and the set operational parametres of elements of the system, to subject casual influences, to define a range of its working capacity and likelihood characteristics. Realisation of the algorithms of the control of a technical condition of system developed on the basis of an offered technique, allows to receive fuller information on degree of mutual influence of subsystems.

Casual search without a gradient for optimisation of multimodes control system in the conditions of presence of structural and parametrical discrepancies is used. As criterion of optimisation the event, consisting that at the set entrance signal the target signal satisfies to the requirement of affinity to demanded value is considered, and all restrictions imposed on system are carried out.

Scope: technical cybernetics.

Научное издание

Саид Жабраил Мусбах Али

**АНАЛИЗ ГРАНИЧНЫХ РЕЖИМОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ
МНОГОРЕЖИМНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

**по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации**

Подписано в печать 04.09.2013. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 60 экз. Заказ 350.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6