

На правах рукописи

ФАМ СУАН ЧЫОНГ

**АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ**

05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации
(информатика, управление и вычислительная техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительные машины, системы и сети» Московского авиационного института.

БРЕХОВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ

Научный консультант: доктор технических наук, с.н.с отдела «Нелинейный анализ и проблем безопасности» ВЦ РАН им. Дородницына А.А.

НГУЕН КУАНГ ТХЫОНГ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная техника и прикладная математика» Московского государственного агроинженерного университета им. В.П.Горячкина.

ВОРОНИН ЕВГЕНИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ.

кандидат физико-математических наук, доцент Научно-исследовательского института вычислительных комплексов им. М.А.Карцева.

ПЕТРОВА ГАЛИНА НИКОЛАЕВНА.

Ведущая организация: **ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.**

Защита диссертации состоится **30 декабря 2013 года в 11⁰⁰ часов** на заседании диссертационного совета Д212.125.11 при ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4.

Автореферат разослан: « 29 » ноября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Кандидат технических наук, доцент

Горбачев Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Важность задач стоящих перед системами летательных аппаратов (ЛА) обуславливает требования высокой безопасности их функционирования. При проектировании таких сложных технических систем (СТС) ЛА, необходимо выбрать оптимальные их варианты, отвечающие наилучшим образом заданным тактико-техническим условиям. Задача оптимизации может быть поставлена в широком или ограниченном плане. В широком плане задача оптимизации вариантов СТС решается путем сравнения нескольких возможных вариантов разработки системы (объекта). В ограниченном плане речь идет о выборе оптимальных значений, параметров при заданной схеме и структуре системы. Реальные значения параметров систем ЛА в каждый момент времени в большей или меньшей степени отличаются от расчетных вследствие воздействия на систему внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Вызванные этими воздействиями вариации параметров элементов в системе ЛА являются причиной неустойчивости её функционирования и могут привести к необратимым последствиям. Поэтому для достижения высокой безопасности функционирования системы ЛА необходимо уже на этапе проектирования учитывать возможные производственные и эксплуатационные вариации параметров ее элементов. К настоящему времени разработан ряд аналитических и экспериментальных методов оценки безопасности технических систем. По этой проблеме имеются исследования в монографиях профессоров Рябинина И.А., Ильичева А.В., Судакова Р.С, Данилин Н.С, Карташев Г.В, Северцева Н.А., Бецкова А.В., Дивеева А.К., Дедкова В.К., Садыхова Г.С., Воронина Е.А. и др. Однако существующие методы оценки безопасности на этапе проектирования фактически не связаны с выбором характеристик элементов систем управления. В связи с этим возникает актуальная задача разработки методов и методик, позволяющих получить количественную оценку

допустимых отклонений параметров и их оптимальных значений при влиянии дестабилизирующих факторов.

Цель работы и задачи исследования.

Цель диссертационного исследования заключается в решении задачи обеспечения безопасности (заданного уровня поля допусков параметров) системы ЛА в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. В соответствии поставленной целью решаются следующие задачи:

1. Исследование математических моделей и критериев безопасности систем ЛА с учетом одновременного воздействия внутренних и внешних факторов.

2. Исследование задач параметрической коррекции системы ЛА по безопасности и разработка математической модели функциональной связи контролируемых параметров системы ЛА, алгоритмов определения допусков и номинала контролируемых параметров системы ЛА с учетом одновременного воздействия внутренних и внешних факторов.

3. Разработка математической модели риска и потерь, связанных с авариями систем ЛА с учетом дестабилизирующих факторов.

Методы исследования.

Результаты диссертационной работы были получены на основе использования теории системного анализа; теории надежности, устойчивости и безопасности систем; методов оптимизации, математического моделирования; теории управления систем; теории вероятностей и математической статистики.

Научная новизна полученных результатов.

В отличие от предыдущих исследований в данной диссертационной работе впервые исследованы и представлены оптимальные модели и алгоритмы безопасности функционирования систем ЛА с учетом дестабилизирующих факторов:

1. Предложена методика выбора оптимальной совокупности контролируемых параметров системы ЛА, обеспечивающая учет одновременного воздействия внутренних и внешних факторов.

2. Разработана объединенная математическая модель функциональной связи контролируемых параметров системы ЛА с параметрами воздействия внутренних и внешних факторов.

3. Разработаны и исследованы алгоритмы определения допусков на значения контролируемых параметров системы ЛА современного поколения, требуемого уровня параметрической надежности и безопасности, что позволило решить задачу оптимизации безопасности функционирования систем ЛА.

4. Обоснован выбор оптимальных показателей безопасности, сформулирована задача управляемости с учетом необходимых условий безопасности класса EAL2 системы ЛА.

Практическая значимость заключается в разработке математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации управления и обработки информации для безопасного функционирования систем ЛА; проведении расчета обобщенных показателей качества функционирования, алгоритмов и методик для управления безопасностью систем ЛА при воздействии дестабилизирующих факторов.

Объектом исследования является безопасность функционирования систем ЛА при воздействии дестабилизирующих факторов.

Предмет исследования - разработка математических моделей, алгоритмов и методик для управления безопасностью систем ЛА при воздействии дестабилизирующих факторов.

Личный вклад автора состоит в последовательном и расширенном проведении системного анализа методов исследования управления безопасностью исследуемого объекта с учетом воздействия возмущающих

факторов, а также разработке и исследовании моделей и алгоритмов процесса оптимизации поля допусков на параметры системы ЛА при воздействии дестабилизирующих факторов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Объединенная математическая модель функциональной связи контролируемых параметров системы ЛА с параметрами воздействия внутренних и внешних факторов.

2. Математическая модель риска и потерь, связанных с авариями систем ЛА с учетом дестабилизирующих факторов.

3. Алгоритмы определения допусков и номинала контролируемых параметров системы ЛА с учетом одновременного воздействия внутренних и внешних факторов.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на международной конференции “Надежность и качество” 2012г, г. Пенза, на постоянном действующем семинаре по проблеме “Фундаментальные проблемы безопасности” ВЦ им. А.А.Дородницына РАН.

Публикации.

Результаты проведенных в диссертационной работе исследований опубликованы в 4 статьях, общим объемом 3 п.л., из них в журналах из перечня ВАК – 2 статьи, общим объемом 1,5 п.л. Результаты, опубликованные совместно с другими авторами, принадлежат соавторам в равных долях.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы (83 наименований). Объем основного текста составляет 123 страниц, 04 таблиц, 22 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненного исследования, сформулированы цель, задачи диссертационной работы, отмечены ее научная новизна и практическая значимость, а также представлена аннотация диссертационной работы по главам.

В первом главе исследованы модели отказоустойчивости, надежности и безопасности систем ЛА, соотношение связи безопасности, надежности и безаварийности и представлены критерии безопасности систем ЛА и структурная функция безопасности.

Вектор $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - это вектор состояния элементов системы т.е. $\vec{x} = \vec{x}(t)$, а функция $\varphi = \varphi(\vec{x})$ - структурная функция работоспособности. Тогда

R -вероятность безотказной работы системы. $R = P\{\varphi(\vec{x}) = 1\} = \sum_{i=1}^M a_i \prod_{j \in E} P\{x_j = 1\}$,

где a_i - целые ($0 \leq i \leq M$), $\varphi(\vec{x}) = \prod_{j \in E} x_j$, $E \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$.

Пусть $\vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ - вектор безотказной работы элементов $R = h(\vec{p})$.

Если $p_j = p$, $1 \leq i \leq n$, то $R = h(p)$. Представляя $h(p)$ в виде полинома:

$$h(p) = \sum_{i=1}^M a_i p_i \quad (1)$$

где a_i - целые ($1 \leq i \leq n$) назовем полиномиальной формой $h(p)$.

Полиномиальную форму можно получить, подставив $p_i = p$, $1 \leq i \leq n$, сгруппировать члены по степеням p .

Рассмотрены связи между отказоустойчивостью и безопасностью системы с построением графа состояний и переходов систем (рис.1)

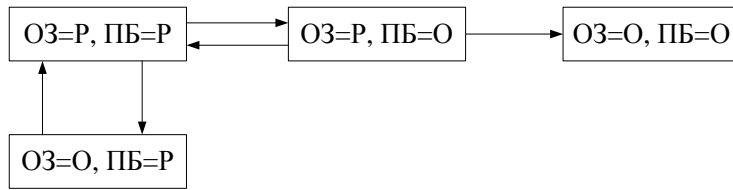


Рис. 1. Граф состояний и переходов функционирования системы.

OЗ - объекта защиты; ПБ - подсистемы безопасности; ОФ - опасное функционирование системы.

В настоящей главе обосновано соотношение связей безопасности, надежности и безаварийности на основе графа состояний и переходов (рис.2), содержащий элементы безопасности функционирования системы (БФ), безопасности отказа (БОт) и безопасности останова (БОс).

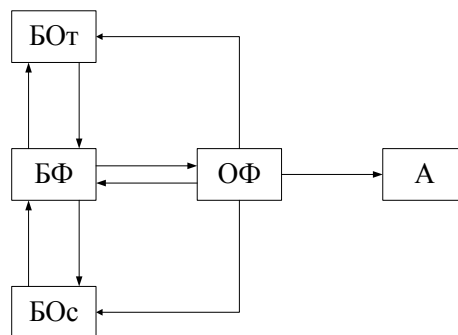


Рис.2. Граф состояний и переходов по безопасности и работоспособности

В данной главе представлены критерии безопасности технических систем. Структурным критерием безопасности состояния системы по отношению к заданной аварии является отсутствие в системе критических элементов.

Функциональным критерием безопасности состояния системы является равенство нулю условной плотности вероятности перехода из данного состояния в состояние аварии.

Далее рассмотрена структурная функция безопасности системы. Множество неаварийных состояний системы (Н А) описывается

индикаторной функцией $\varphi_A(\bar{X}): B^n \rightarrow B$, такой, что $\varphi_A(\bar{X})=1$ если $\bar{X} \in HA$ и $\varphi_A(\bar{X})=0$ в противном случае, где B - множество значений логических переменных и функций, $B = \{0,1\}$.

$$e(\bar{X}) = \prod_{i=1}^n \varphi_A(O_i, \bar{X}) \quad (2)$$

Зная множество минимальных сечений СФБС, для нее нетрудно построить аналитическое выражение, используя методы построения аналитических форм для СФРС, а затем, используя методы построения вероятностных форм для булевых функций от случайных переменных, получить выражение для вероятности безопасного функционирования системы.

В второй главе представлена классификация задач параметрической коррекции исследуемой системы ЛА по безопасности, проведен системный анализ задач параметрической коррекции системы ЛА по безопасности, разработана и исследована объединенная математическая модель функциональной связи контролируемых параметров системы ЛА, алгоритмов определения допусков и номинала контролируемых параметров системы ЛА с учетом одновременного воздействия внутренних и внешних факторов (алгоритм построения бруса Ω_0 и алгоритм построения бруса Ω_B).

Критерии качества технической системы $F_j(*), j = \overline{1, m}$:

$$F_{j \min} \leq F_j(*) \leq F_{j \max} \quad (3)$$

где $F_{j \min}, F_{j \max}$ - допустимые пределы вариации значения j -го критерия качества системы, заданные техническим заданием. Каждому j -му требованию к качеству системы можно поставить в соответствие некоторую подобласть Ω_j области устойчивости Ω_y ($\Omega_j \leq \Omega_y$) так, что для $\forall \bar{X} \in \Omega_j$ значение j -го критерия при любом входном воздействии будет удовлетворять неравенству (3).

В общем случае качество системы управления объектом можно оценить следующим выражением:

$$\Phi(\bar{X}, T) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \int \dots \int_{\Omega} f(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_m; t_1, \dots, t_m) \times D(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_m) d\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_m \quad (4)$$

где $\Phi(\bar{X}, T)$ - эффективность функционирования системы в течении времени T ;

Ω - область допустимых значений параметров ; $0 \leq t_1, t_2, \dots, t_m \leq T$;

$\tau = \max(t_{i+1}, t_i)$; $f(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_m; t_1, \dots, t_m)$ - плотность совместимого распределения m

значений случайного процесса $\bar{X}(t)$. Номинальное значение i -го параметра, как

математическое ожидание m_{xi} процесса $x_i(t)$ в момент времени $t = 0$, и

обозначим через x_{hi} ,

$$x_{hi} = m_{xi} \quad (5)$$

Функция $D(\bar{X})$ характеризует область Ω с точки зрения целевого назначения системы и определяет связь между эффективностью и значениями параметров системы:

$$D(\bar{X}) = \begin{cases} 1, \bar{X} \in \Omega \\ 0, \bar{X} \notin \Omega \end{cases} \quad (6)$$

Математическая модель процесса изменения параметров исследуемой системы управления, область Ω и функция $D(\bar{X})$ определяют конкретный вид критерия оптимизации (4). Если справедливо (6) то

$$\Phi(\bar{X}, T) = P(\bar{X}, T) \quad (7)$$

где $P(\bar{X}, T)$ - вероятность безотказной работы системы в течении времени T и

является количественной оценкой надежности работы исследуемой системы управления объектом. На основе данного критерия разработан поисковый алгоритм решения задачи коррекции номиналов для случая, когда область Ω имеет произвольную конфигурацию.

В данной главе разработана объединенная математическая модель функциональной связи контролируемых параметров системы ЛА. Процессы изменения параметров элементов можно представить нестационарным аддитивным случайным процессом вида

$$X(t) = R(t) + \mathcal{G}(t) \quad (8)$$

где $R(t)$ – некоторая функция времени, $\mathcal{G}(t)$ – стационарный случайный процесс. Аппроксимации составляющей $R(t)$ процесса изменения параметра достигается многочленами не выше второй степени, т.е.

$$R(t) = \mathcal{G}_0 + \mathcal{G}_1 t + \mathcal{G}_2 t^2 \quad (9)$$

или
$$R(t) = \mathcal{G}_0 + \mathcal{G}_1 t \quad (10)$$

Требуется подобрать коэффициенты аппроксимирующей функции (9) так, чтобы сумма квадратов отклонений $\Delta = \sum_{i=1}^n (x_i - \mathcal{G}_0 - \mathcal{G}_1 t_i - \mathcal{G}_2 t_i^2)^2$ были минимальной.

Далее разработаны и исследованы алгоритмы определения допусков на параметры безопасности системы управления ЛА.

Пусть F есть обобщенный показатель живучести объекта, который функционально связан с параметрами СУ x_1, \dots, x_n :

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (11).$$

Физически пределы изменения параметров x_1, \dots, x_n ограничены и область H их возможных значений задана неравенствами

$$A_i^0 \leq x_i \leq B_i^0 \quad (12)$$

где A_i^0, B_i^0 – неизвестные числа.

Требуется найти такие величины $x_{i \min} \in H$ и $x_{i \max} \in H$ чтобы для всех x_i удовлетворяющих условиям:

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, i = \overline{1, n} \quad (13)$$

область Ω_0 – называемая брусом:

$$x_{i\min}^0 \leq x_i \leq x_{i\max}^0, i = \overline{1, n} \quad (14)$$

где $x_{i\min}^0 \in H$ и $x_{i\max}^0 \in H$ и каждая его грань должна иметь хотябы одну точку, принадлежащую области Ω , с учетом ограничения: $\Omega \in \Omega_0$; и область Ω_B - называемый брусом вложений в область Ω , при условии $\Omega_B \leq \Omega$; V - объем области Ω , V_0 и V_B - объем Ω_0 и Ω_B ; Π_0 и Π_B - параметр Ω_0 и Ω_B .

Пусть область Ω представляет собой эллипсоид, описываемый уравнением

$$\bar{x} \cdot A \cdot (\bar{x})^T + C = 0 \quad (15)$$

где A - симметрическая матрица коэффициентов размерности $n \times n$, C - константа.

Пусть x_0 - точка эллипсоида, определяющая искомый брус. Вершины этого бруса с помощью матрицы отражения запишутся как $M_i x_0$, $i = 1, 2, \dots, 2^n$ удовлетворяющие неравенствам

$$\bar{x}_0 \cdot \overline{M_i} \cdot A \cdot (\overline{M_i})^T (\bar{x}_0)^T \leq C, i = 1, 2, \dots, 2^n \quad (16)$$

Задача вложения бруса максимального периметра или максимального объема в эллипсоид (15) представляет собой задачу: $\max \Phi(x)$ (17)

на множестве ограничений

$$x M_i A M_i^T x^T \leq C, i = 1, 2, \dots, 2^n, x \geq 0 \quad (18)$$

где функция $\Phi(x)$ - функция, определяющая периметр или объем вкладываемого бруса множество точек удовлетворяющих ограничениям (16).

Алгоритм построения бруса Ω_0 .

Пусть область Ω ограничена поверхностью

$$F(\bar{X}) = F_0 \quad (19)$$

где \bar{X} - вектор, компонентами которого является параметры исследуемой системы; F_0 - заданное значение критерия $F(\bar{X})$.

Двигаясь по поверхности (19), найдутся точки, которые будут принадлежать гроньям бруса Ω_0 (точки касания). Через найденные точки

проведены плоскости, параллельные координатным плоскостям. Пересечение этих плоскостей определит брус Ω_0 . Поиск точек касания по i -ой координате осуществляется следующим образом

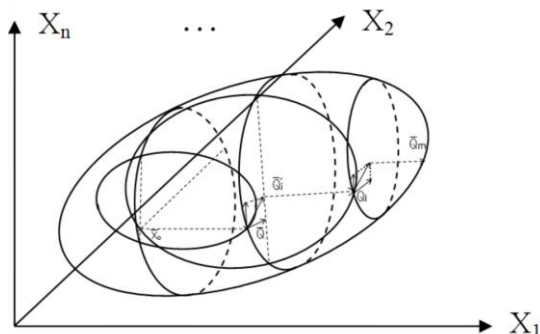


Рис.4. Геометрическая иллюстрация поиска точки касания областей определения по i -ой координате.

1. Из точки, полученной на предыдущем шаге и лежащей в области Ω (первоначально эта точка может быть любой из множества Ω , например, точка \overline{X}_0 (рис.4). Далее надо продолжить движение вдоль оси OX_i , в сторону ее увеличения- уменьшения до пересечения границы области Ω (на рис.4 это точка Q). При этом остальные компоненты вектора \overline{X} остаются неизменными.

2. Значение компоненты x_i на границе области Ω сравниваем с ее значением в исходной точке. Если новое значение x_i возросло (уменьшилось), то переходим к следующему пункту 3. В противном случае к п.4.

3. Из найденной точки (точка Q на рис. 4) делаем шаг в область Ω , точки Q_i^1 на рис. 4 при фиксированной координате x_i . Знак приращения по координате x_j ($j \neq i$) определяется следующим соотношением:

$$Sign\Delta X_j = \begin{cases} SignE_{ij} & \text{при поиске } x_{i\max} \\ 1 - SignE_{ij} & \text{при поиске } x_{i\min} \end{cases} \quad (20)$$

где

$$Sign\Delta X = \begin{cases} 0 & \text{при } \Delta x \geq 0 \\ 1 & \text{при } \Delta x < 0 \end{cases}; E_{ij} = -\frac{\partial F}{\partial x_j} : \frac{\partial F}{\partial x_i} \quad (21)$$

Величины $|\Delta x_j|, j \neq i$ выбираются исходя из требуемой точности построения бруса Ω_0 . С увеличением $|\Delta x_j|$ уменьшается точность, а скорость поиска увеличивается. Поэтому при решении конкретной задачи существуют некоторые оптимальные значения $|\Delta x_j|$, которые при приемлемой точности обеспечивают высокую скорость поиска $x_{i_{\max}}$ ($x_{i_{\min}}$).

4. Проверяется все ли величины $x_{i_{\max}}$ и $x_{i_{\min}}$ ($i = \overline{1, n}$) найдены. Если «да», то переходим к п.6; если «нет», то к п.5.
5. Индекс i увеличивается на единицу и управление передается к п.1.
6. Конец поиска.

Блок-схема алгоритма построения бруса Ω_0 представлена на рис.5.

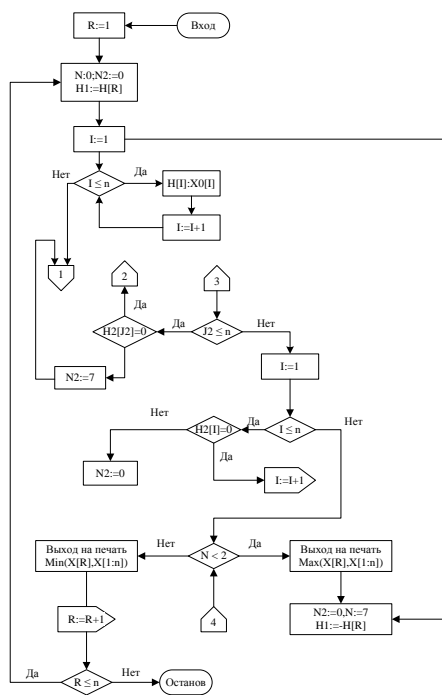


Рис. 5. Блок- схема построения бруса

Ω_0

Алгоритм построения бруса Ω_b .

Из точки на границе области Ω проведем лучи, параллельные координатным осям. Пересечение этих прямых с областью Ω определяет n

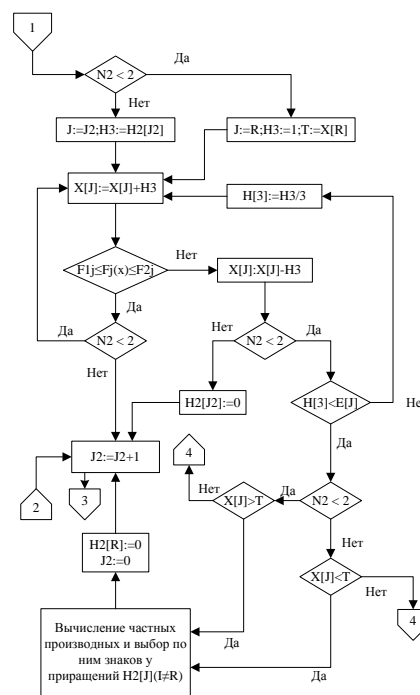


Рис.6. Продолжение рис. 5.

вершин бруса первого приближения Ω_B^1 . Остальные $2^n - (n+1)$ вершины могут и не принадлежать области Ω . Поэтому надо найти те из вершин бруса Ω_B^1 , которые лежат вне области Ω , и сместить их внутрь допустимой области (уменьшая соответствующие линейные размеры бруса Ω_B^1). Перебирая последовательно из $2^n - (n+1)$ вершин и делая необходимую корректировку линейных размеров Ω_B^1 , получим искомый брус Ω_B . Порядок перебора примем следующий. Сначала проверяем вершины, лежащие в двухмерных гранях, параллельных координатным плоскостям и включающих в себя исходную вершину бруса Ω_B^1 . Если проверяемая вершина лежит вне области Ω , то ее соединяют диагональю с исходной вершиной и находят точку пересечения диагонали с областью Ω и соответственно деформируют брус Ω_B^1 .

Блок-схема алгоритма построения бруса Ω_B показана на рис.7.

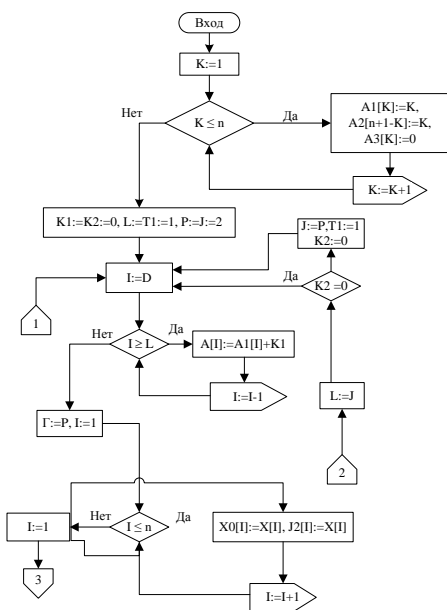


Рис.7. Блок-схема программы построения бруса Ω_B

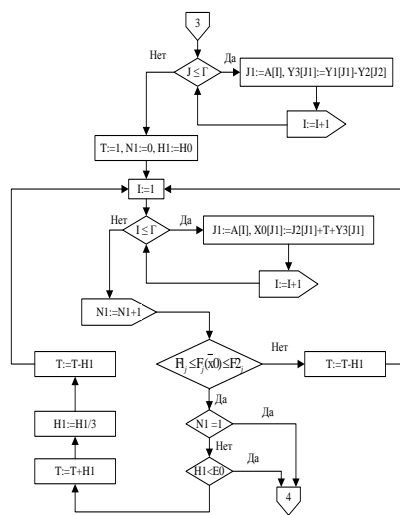


Рис.8. Продолжение 1.

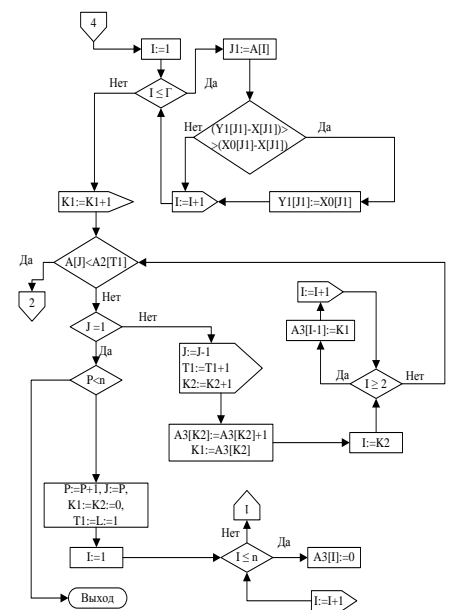


Рис.9. Продолжение 2.

В данной главе также разработан и исследован алгоритм выбора номинала параметров безопасности системы управления. Требуется найти минимум

функционала $\Phi(\bar{\omega})$, где $\bar{\omega}$ - вектор оптимизируемых параметров. На первом этапе $i+1$ -го шага поиска минимума функционала $\Phi(\bar{\omega})$ из m_1 пробных точек

$$\bar{Y}_{i+1}^{(j)} = \bar{\omega}_{i-2} + (\bar{\omega}_i - \bar{\omega}_{i-2})hZ^{(j)}, j = \overline{1, m_1} \quad (22)$$

где h - длина пробного шага, Z - случайная величина, распределенная равномерно на отрезке $[0,1]$, выберется та точка, удовлетворяющая условию

$$\Phi(\bar{Y}_{i+1}) = \inf_{j \in [1, m_1]} \Phi(Y_{i+1}^{(j)}) \quad (23)$$

и получено

$$\bar{\omega}_{i+1}^{(k)} = \sigma \bar{G}^{(k)} + \bar{Y}_{i+1} \quad k = \overline{1, m_2} \quad (24)$$

где $\sigma = r \|\bar{\omega}_i - \bar{\omega}_{i-2}\|$ - радиус сферы с центром в точке \bar{Y}_{i+1} , r - константа,

$\|\bar{\omega}\| = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2}$ - норма вектора $\bar{\omega}$ (здесь $\bar{\omega} = \bar{\omega}_i - \bar{\omega}_{i-2}$), $\bar{G}^{(k)}$ - вектор,

компонентами которого являются независимые нормально распределенные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Из всех $\bar{\omega}_{i+1}^{(k)}$ запоминаем такой вектор $\bar{\omega}_{i+1}$, для которого

$$\Phi(\bar{\omega}_{i+1}) = \inf_{k \in [1, m_2]} \Phi(\bar{\omega}_{i+1}^{(k)}) \quad (25)$$

Таким образом

$$\bar{\omega}_{i+1} = \bar{\omega}_{i-2} + (\bar{\omega}_i - \bar{\omega}_{i-2})hZ^* + \sigma \bar{G}^*$$

где Z^* и \bar{G}^* удовлетворяют условиям (22) и (24) соответственно.

На рис.10. приведена геометрическая иллюстрация поиска на первом этапе, где первые три точки взяты произвольно.

Для проверки работоспособности предлагаемого алгоритма была получена серия экспериментальных расчетов на компьютере по отысканию глобального минимума функционала.

$$\Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \sum_{i=1}^n (\omega_i^2 - \cos(18\omega_i)) \quad (26)$$

с зоной поиска $-1 < \omega_i < 1$ при $n = 2, 3$ и 5 . Для сравнения те же расчеты проводились по известным алгоритмам с направляющей сферой и с направляющим конусом. Результаты проверки показали более высокую эффективность предлагаемого алгоритма. Кроме того, в процессе исследования установлено, что новый алгоритм менее критичен, чем два других, к оптимальным значениям собственных параметров, что значительно облегчает его настройку при решении практических задач.

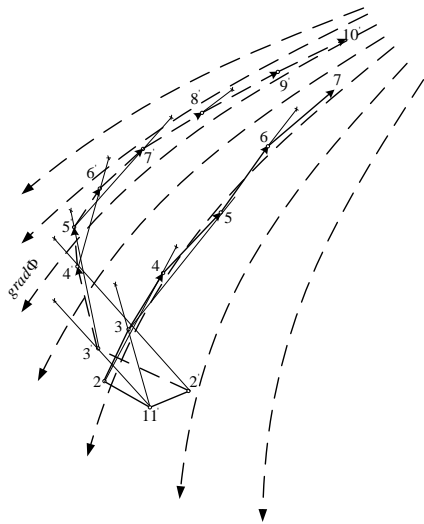


Рис.10. Движение системы поиска в пространстве параметров (исходные три точки произвольные)

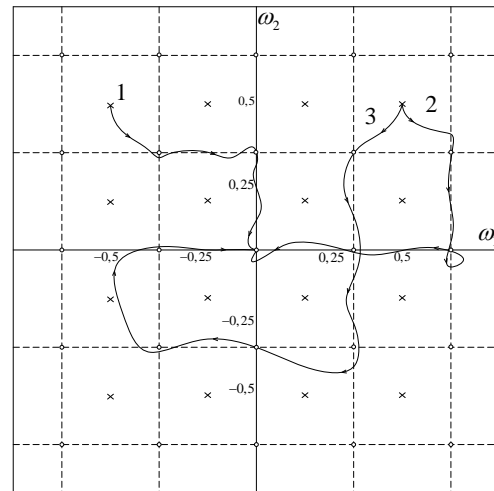


Рис.11. Траектории движения системы поиска

На рис.11. показаны результаты моделирования поиска при $n = 2$ в виде траекторий на плоскости параметров. Здесь пунктиром обозначено направление дна оврагов, точками показаны промежуточные минимумы функции качества, а крестиками изображены ее максимумы. Глобальный минимум расположен в центре допустимой области при $\omega_1 = \omega_2 = 0$. Система поиска начинала движение из точки с координатами $\omega_{10} = \omega_{20} = 0,5$. В среднем система поиска

достигает цели за 140 рабочих шагов (траектории 1 и 2) для нового алгоритма и за 170 рабочих шагов (траектория 3) для алгоритма с направляющим конусом.

Уточнение решения на втором этапе осуществляется по известному алгоритму наискорейшего спуска.

Градиент $\Phi(\bar{\omega})$ в точке $\bar{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ определяется выражением

$$\text{grad}\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{\partial\Phi}{\partial\omega_i} \omega_i^o \quad (27)$$

где ω_i^o - орты осей переменных величин ω_i , $\frac{\partial\Phi}{\partial\omega_i}$ - значения соответствующих частных производных в точке $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$. При достаточно малых $\Delta\omega_i$ можно приближенно за градиент Φ принять выражение

$$\text{grad}\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega_i} \omega_i^o \quad (28)$$

После определения градиента Φ по формуле (27) или (28) осуществляется движение вдоль прямой, совпадающей с направлением противоположным направлению градиента, до точки, в которой достигается минимальное значение функционала Φ . Затем в этой точке снова определяется градиент и движение совершается по прямой, соответствующей противоположному направлению нового градиента и т.д.

В третьей главе проведен системный анализ определения параметров состояния и параметров наблюдения объекта для обеспечения безопасности, представлена методология нормирования риска, связанного с применением систем ЛА, разработана математическая модель риска и потерь, связанных с авариями систем ЛА с учетом дестабилизирующих факторов, а также методика оптимизации показателей риска и управления риском аварии систем ЛА.

Расстояние между любыми двумя соседними подсистемами s, s_1 является действительной функцией $R(s, s_1)$ и в пространстве состояний P характеризуется вектором p с координатами p_1, p_2, \dots, p_n

$$f(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0 \quad (29)$$

Пусть имеется h гиперповерхностей s_1, s_2, \dots, s_n , каждая из которых отражает реально существующую физическую связь между координатами p_i

$$\left. \begin{aligned} f_1(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0, \\ f_2(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0, \\ &\dots \\ f_h(p_1, p_2, \dots, p_n) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Рассмотрим m - мерное многообразие выражаемое уравнениями, в n - мерном пространстве состояния P и вычисляем дифференциал дуги по кривой, расположенной на многообразии в координатах X_1, \dots, X_m пространства наблюдения X :

$$dS^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_{ij}(X_1, \dots, X_m) dX_i dX_j \quad (31)$$

Выражения для компонент G_{ij} метрического тензора G

$$G_{ij}(p_1, p_2, \dots, p_n) = \left[\frac{\partial P_1}{\partial X_i} \frac{\partial P_1}{\partial X_j} + \frac{\partial P_2}{\partial X_i} \frac{\partial P_2}{\partial X_j} + \dots + \frac{\partial P_n}{\partial X_i} \frac{\partial P_n}{\partial X_j} \right] \quad (32)$$

В этом случае, если $G_{ik} = 0$ ($i \neq k$), а $G_{ii} = 1$ имеем евклидово пространство. При $G_{ik} = 1$ происходит деформация пространства наблюдения: $G_{ii} > 1$ – сжатие, при $G_{ii} < 1$ – растяжение. Если $G_{ik} \neq 0$ ($i \neq k$), то происходит еще более сложное искажение пространства наблюдения. Следовательно метрический тензор характеризует структуру риманова пространства.

Таким образом, пространство X , в котором проводят наблюдения за состоянием систем ЛА (объекта), характеризуется матричным тензором, который определяется с помощью уравнений (30) явления (процесс). Зная

метрический тензор, можно определить метрику пространства наблюдения X — это метрика риманова пространства.

Проведенный системный анализ пространства состояний для выявления структуры наблюдения позволяет сделать заключение о существовании особых свойств у объекта (ЛА) измерения, обусловленных наличием взаимосвязи между параметрами.

В данной главе разработана математическая модель риска и потерь, связанных с авариями систем ЛА с учетом дестабилизирующих факторов.

Показатель безопасности является одним из показателей качества системы, определяющим ее пригодность к применению по условиям безопасности. Поэтому развитие системы в координатах «риск — суммарные затраты на разработку, изготовлена испытания и понесенный ущерб при аварии» также подчиняется логистической зависимости.

Получено математическое ожидание суммарных потерь (ущерба), связанных с риском наступления неблагоприятно события;

$$M[Y(R)] = M[S(R)] + M[\Psi(R)] \quad (33)$$

где $M[S(R)]$ — математическое ожидание затрат, используемых на достижение выбранного уровня безопасности ОСТ (включая затраты на разработку, производство, испытания эксплуатацию); $M[\Psi(R)]$ — математическое ожидание затрат связанных с риском, которому подвергаются окружающая среда и социальные объекты при данном уровне риска.

Поэтому потери $S_{\text{пот}}$, связанные с изменением показателей эффекта ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$) или с досрочным списанием ОСТ, до истечения срока нормальной эксплуатации ($T_э - t_a$) также выражаются их математическими ожиданиями

$$M[S_{\text{пот}}] = M[\Pi((T_э - t_a), \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n)] \quad (34)$$

где $\Pi((T_э - t_a), \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n)$ — функция потерь.

При линеаризации получено

$$\left. \begin{aligned} M\left[\Pi((T_s - t_a), \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n)\right] &= \Pi(T_{\text{ост}}, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n), \\ S_{\text{д}} &= \gamma \Pi(\bar{T}_{\text{ост}}, \bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3, \dots, \bar{\theta}_n) \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Потери выражаются вторым и третьим слагаемыми, т. е.

$$M[S_{\text{пот}}] = \gamma \left[\frac{\partial \Pi}{\partial T_{\text{ост}}} \Delta T_{\text{ост}} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \Pi}{\partial \theta_i} \right) \Delta \theta_i \right] \quad (36)$$

где $\Delta T_{\text{ост}} = T_{\text{ост}} - \bar{T}_{\text{ост}}$, $\Delta \theta_i = \theta_i - \bar{\theta}_i$

Потери, выражаемые формулой (36), должны учитываться программой разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации систем, т. е. являться составной частью затрат, представленных на рис.12. функцией $M[S(R)]$.

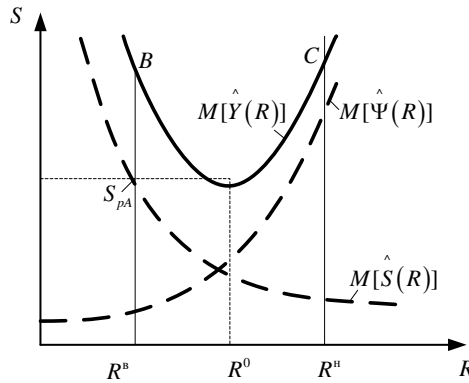


Рис.12. Построение области существования оптимума суммарных затрат и риска

Далее разработана методика оптимизации показателей риска и управление риском аварии ЛА с учетом дестабилизирующих факторов.

Задача оптимизации состоит в том, что требуется найти отклонения $\Delta q_0 = q_0 - q_{\bar{0}}$ и $\Delta y_0 = y_0 - y_{\bar{0}}$ оптимальных параметров q_0 и y_0 от базовых значений для минимизации риска R при заданных пределах изменения x_0, y_0 , т.е.

$$\left. \begin{aligned} R(\Delta q, \Delta y) &= (q_{\bar{0}} + \Delta q_0)(y_{\bar{0}} + \Delta y_0) - a \Delta q_0 y_{\bar{0}} - b \Delta y_0 q_{\bar{0}} = \min, \\ q_1 - q_{\bar{0}} &\leq \Delta q \leq q_2 - q_{\bar{0}} \\ y_1 - y_{\bar{0}} &\leq \Delta y \leq y_2 - y_{\bar{0}} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Функция $R(\Delta q, \Delta y)$ преобразуется к следующему виду:

$$R(\Delta q, \Delta y) = q_0 y_0 + y_0 \Delta q + q_0 \Delta y + \Delta q \Delta y - a y_0 \Delta q - b q_0 \Delta y \quad (38)$$

Произведением величин второго порядка малости $\Delta q \Delta y$ можно пренебречь по сравнению с остальными членами. Введем новые переменные \bar{q} и \bar{y} позволяющие записать целевую функцию в относительных (центрированных) переменных:

$$\bar{q} = \frac{q - q_0}{q_0} = \frac{\Delta q}{q_0}, \bar{y} = \frac{y - y_0}{y_0} = \frac{\Delta y}{y_0}$$

Подставляя новые переменные в выражение (57), получим

$$R(\bar{q}, \bar{y}) = q_0 y_0 + q_0 y_0 \bar{q} + q_0 y_0 \bar{y} - a q_0 y_0 \bar{q} - b q_0 y_0 \bar{y} \quad (39)$$

Введем новую целевую функцию \bar{R} , экстремумы которой совпадают с экстремумами функции R :

$$\bar{R} = \frac{R - q_0 y_0}{q_0 y_0} = (1 - a) \bar{q} + (1 - b) \bar{y} \quad (40)$$

Функция риска (40) является центрированной относительно риска базового варианта. После этих преобразований постановка задачи может быть записана следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}(\bar{q}, \bar{y}) &= (1 - a) \bar{q}_0 + (1 - b) \bar{y}_0 = \min; \\ \bar{q}_1 &\leq \bar{q} \leq \bar{q}_2 \\ \bar{y}_1 &\leq \bar{y} \leq \bar{y}_2 \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

где $\bar{q}_1 = \frac{q_1 - q_0}{q_0}, \bar{q}_2 = \frac{q_2 - q_0}{q_0}, \bar{y}_1 = \frac{y_1 - y_0}{y_0}, \bar{y}_2 = \frac{y_2 - y_0}{y_0}$ - центрированные переменные.

Сформулированная задача решается известным алгоритмом линейного программирования.

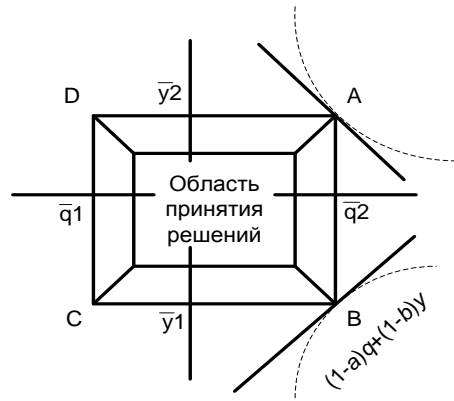


Рис.13. Область возможных оптимальных решений относительно величины риска.

В результате решения получен суммарный безусловный риск:

$$R_{\Sigma}(q, y)_0 = \left(\sum_{j=1}^k M[Y_j] \right) q_{i0} = \sum_{j=1}^k q_{i0} y_{j0} \quad (42)$$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Исследованы модели отказоустойчивости, надежности как основополагающие компоненты безопасности систем ЛА.

2. Представлен критерий безопасности функционирования и структурной безопасности класса EAL2 систем ЛА с учетом параметрических возмущений.

3. Разработана и исследована объединенная математическая модель функциональной связи контролируемых параметров системы ЛА с параметрами воздействия внутренних и внешних факторов. На основе полученной модели разработаны алгоритмы определения допусков и номинала контролируемых параметров системы ЛА с учетом одновременного воздействия внутренних и внешних факторов.

4. Проведен системный анализ определения параметров состояния и параметров наблюдения систем ЛА для обеспечения безопасности.

5. Разработана математическая модель риска и потерь, связанных с авариями систем ЛА с учетом дестабилизирующих факторов, а также методика

оптимизации показателей риска и управления риском, определяющей неприемлемые ситуации функционирования систем ЛА.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях и журналах:

1. Брехов О.М, Нгуен Куанг Тхыонг, Фам Суан Чыонг. Методика оптимизации управления риском для обеспечения безопасного функционирования летательных аппаратов. «Вестник МАИ», 2012, № 5, стр. 147-151.

2. Фам Суан Чыонг, Нгуен Чунг Тин. Классификация задач параметрической коррекции системы управления по безопасности. «Нейрокомпьютеры. Разработка. Применение», 2012, № 10, стр. 70-72.

В других научных изданиях и журналах:

1. Нгуен Куанг Тхыонг, Фам Суан Чыонг. Алгоритмы определения допусков на параметры системы управления. «Мир современной науки», 2012, № 6, стр. 14-24.

2. Нгуен Куанг Тхыонг, Фам Суан Чыонг. Алгоритм выбора номинала параметров системы управления. «Мир современной науки», 2012, № 6, стр. 24-32.