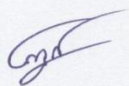


На правах рукописи

ЧЖО ЗИН ХТУТ

**РЕДУЦИРОВАННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ И  
АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ  
ПРИЦЕЛЬНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (в технических системах)



**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2018 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Неусыпин Константин Авенирович**  
Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Системы  
автоматического управления»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Афанасьев Валерий Николаевич**  
Доктор технических наук, профессор,  
профессор ВШЭ-МИЭМ

**Никулин Александр Степанович**  
Кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник АО «Раменское  
приборостроительное конструкторское  
бюро»

Ведущая организация: **АО «ВПК «НПО машиностроение»**

Защита состоится « 18 » сентября 2018 г. В 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.02 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д. 10, факультет «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.bmstu.ru> МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул. д.5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » июня 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.02  
кандидат технических наук, доцент



И.В. Муратов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Эффективность применения современных высокоманевренных летательных аппаратов (ЛА) определяется не только их летно-техническими характеристиками и вооружением, но и возможностями бортового оборудования по информационному обеспечению боевых действий, управлению оружием и защите ЛА.

Интеграция бортового оборудования привела к появлению на борту ЛА прицельно-навигационных комплексов (ПНК), являющихся основой бортового оборудования.

Измерительные системы ПНК имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Для компенсации погрешностей используются известные алгоритмические методы, а также возможности реконфигурирования структуры и адаптации к внешним условиям и внутреннему состоянию ПНК.

В состав ПНК ЛА входят базовые автономные навигационные системы, в частности инерциальные навигационные системы (ИНС) спутниковые навигационные системы (СНС), радионавигационные системы, геофизические и оптические системы, БЦВМ, а также комплексная обработка информации (КОИ). Одной из важных задач при эксплуатации ПНК ЛА является сохранение его работоспособности и высокой эффективности. Для определения работоспособности и качества функционирования ПНК применяются различные системы контроля, повышения отказоустойчивости и помехозащиты.

Условия функционирования современных ЛА отличаются высокими скоростями, большими высотами и дальностями полета, действием разнообразных и многочисленных внешних факторов. Вместе с тем требования к точности и надежности навигационного оборудования возрастают. Условия, в которых используется бортовое навигационное оборудование, накладывают жесткие ограничения на физические, технические и эксплуатационные характеристики систем. Одной из важнейших задач при эксплуатации бортового оборудования ЛА является оценка состояния аппаратуры комплекса, диагностика ее отказов и управление функционированием всей аппаратуры как в соответствии с ее состоянием, так и в соответствии с изменяющимися внешними условиями. Для этого применяются различные системы повышения отказоустойчивости, помехозащиты и контроля на различных этапах эксплуатации ПНК. Используются иерархические системы, хорошо зарекомендовавшие себя на практике, в которых оценивается работоспособность и достоверность информации отдельных систем и комплекса бортового оборудования в целом. Однако при решении задачи сохранения работоспособности бортового оборудования целесообразно знать не только момент отказа бортовых систем, но и предвидеть момент возникновения аварийной ситуации, а также интервалы недостоверной работы оборудования. Решение этой задачи с помощью априорных прогнозирующих моделей требует проведения длительных дорогостоящих экспериментов, не позволяет учитывать особенности конкретных систем и осуществлять эффективный контроль высокоманевренных ЛА. Поэтому для повышения отказоустойчивости и



осуществления контроля бортового оборудования перспективных маневренных ЛА целесообразно использовать комплексные системы контроля на базе динамических экспертных систем (ДЭС), которые позволяют учитывать режимы полета ЛА, имеют богатую базу данных и ансамбль оценочных критериев. Применение ДЭС на борту ЛА сопряжено со сложностями реализации, требованиями повышенной производительности БЦВС.

Большой вклад в создание систем повышения отказоустойчивости авионики внесли Умеров А.А., Синдеев И.М., Барзилович Е.Ю., Далецкий С.В., Джанджгава Г.И., Пархоменко П.П., Деркач О.Я., Коптев А.Н., Прилепский В.А., Саханов К.Ж., Ергалиев Д.С., Лисин С.П., Первушин Р.Ю., Г. Чжен., Е.М. Эннинг, Г. Метц., У. Фитч., Г. Хером., К. Фабьен.

ПНК и КОИ ЛА должны иметь высокую помехо- и отказоустойчивость, позволяют получать достоверную навигационную информацию во всем диапазоне условий их функционирования.

Таким образом, выделен комплекс проблем, который целесообразно решить в процессе диссертационного исследования: разработать структуры систем и алгоритмов для повышения отказоустойчивости и работоспособности ПНК ЛА на основе принципов функционирования ДЭС.

**Объект исследования.** В качестве основного объекта исследования в диссертации рассматриваются ПНК атмосферных ЛА.

**Предметом исследования** служат алгоритмы обработки информации и динамические экспертные системы ПНК ЛА.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование алгоритмов повышения отказоустойчивости и редуцированных динамических экспертных систем ПНК ЛА.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

1. Разработка алгоритмов повышения отказоустойчивости авионики маневренного атмосферного ЛА.
2. Исследование моделей и систем диагностики состояния ПНК современных ЛА.
3. Разработка структур динамических экспертных систем ПНК ЛА.
4. Разработка алгоритмов и средств повышения отказоустойчивости измерительных комплексов и ПНК ЛА.

**Методы исследования.** При решении сформулированных задач использовались методы теории автоматического управления, системного анализа, теории контроля, вычислительные методы, методы математического моделирования и язык программирования CLIPS.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана структура системы регенерации измерительного комплекса в составе ПНК, в котором функция восстановления реализована с помощью эволюционного алгоритма построения прогнозирующих моделей и регулятора.

2. Создан комплекс алгоритмов повышения отказоустойчивости бортовой аппаратуры, применяемый в ДЭС, включающий алгоритмы оценивания, построения моделей определяющих параметров, прогнозирования и контроля.

3. Разработана система диагностики бортовых измерительных средств, которые используются для измерения параметров ЛА. Для оценивания и прогнозирования состояния гироскопов используются априорные модели, алгоритмы идентификации и эволюционные алгоритмы построения прогнозирующих моделей.

4. Разработана система повышения отказоустойчивости ПНК, включающая редуцированную ДЭС и интеллектуальную компоненту – акцептор действия, отличающаяся компактностью за счет анализа ключевых параметров измерительных систем ПНК.

5. Разработана система повышения отказоустойчивости для современного ПНК ЛА с редуцированной структурой на основе нечеткой ДЭС, эволюционных алгоритмов построения прогнозирующих моделей.

**Практическая ценность результатов исследования.** Разработанная редуцированная структура ДЭС позволяет реализовать функцию повышения отказоустойчивости авионики современных маневренных атмосферных ЛА в серийных БЦВМ.

Алгоритмы и системы легко реализуемы в спецвычислителе или БЦВМ. Разработанные алгоритмы позволяют вычислять прогнозные значения погрешностей систем авионики ЛА и предотвратить выход из диапазона устойчивой работы. Разработанная структура редуцированной ДЭС и комплекс алгоритмов обеспечивают работоспособность и отказоустойчивость оборудования ЛА и позволяют получать достоверную информацию о параметрах ЛА.

**Достоверность и обоснованность** научных положений и результатов подтверждены корректным использованием математических методов, моделей и алгоритмов, а также достаточным объемом численного моделирования и полученными непротиворечивыми результатами, которые согласуются с известными данными, опубликованными в открытой печати.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационного исследования, а также разработанные алгоритмы коррекции, оценивания и прогнозирования были применены как в учебном процессе на кафедрах «Компьютерные системы и сети» и «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, так и при реализации научно-технической работы Госзадание № 2.7486.2017/БЧ.

**Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:**

1. Алгоритмическое обеспечение системы повышения отказоустойчивости измерительного комплекса и ПНК ЛА, базирующееся на прогнозирующих нелинейных математических моделях погрешностей измерительных систем и датчиков.

2. Структура и алгоритмы редуцированной ДЭС, основанный на применении интеллектуальных технологий, сформированных с помощью теории функциональных систем, а также система повышения отказоустойчивости ПНК, базирующаяся на нечеткой ДЭС.

**Апробация работы.** Основные результаты докладывались и обсуждались на: научном семинаре кафедры «систем автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2016, 2017, 2018); Международном симпозиуме «Современные аспекты фундаментальных наук» (Дедовск, 2015); Восьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2015); Международной научно-практической конференции «Достижение вузовской науки» (Москва, 2016); Международной научно-практической конференции «Экономика, Управление, Техника: Проблемы и Перспективы Развития» (Дедовск, 2016); Десятой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2017); Сборник статей X международной научно - практической конференции «EurasiaScience» (Москва, 2017); Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления (Москва, 2018).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 3 статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, объемом 4.3 п.л./ 1.8 п.л.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 130 машинописных страницах, содержит 49 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 115 наименований работ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы и направления исследований, проводимых в диссертационной работе, практическая значимость темы, а также приведено краткое содержание работы.

**В первой главе** диссертации рассмотрены известные методы повышения отказоустойчивости, диагностики и системы контроля состояния современных технических систем.

Взаимосвязь процесса контроля технического состояния сложных авиационных систем представлена на Рис. 1.

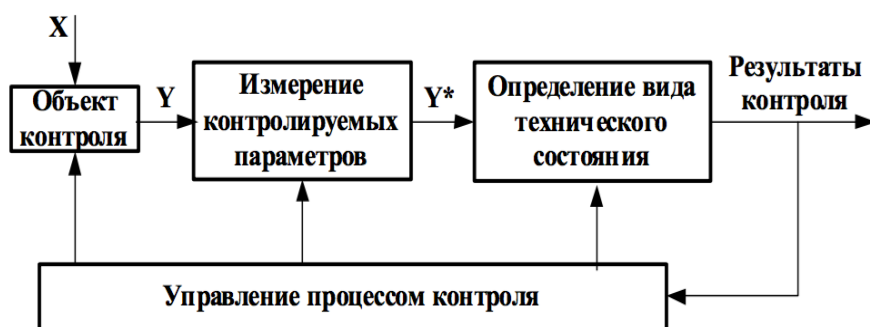


Рис. 1. Схема модели контроля технического состояния.

Здесь на Рис.1 введены следующие обозначения:  $X$  - вектор контролируемых характеристик;  $Y$  - вектор выходных характеристик;  $Y^*$  - вектор результатов измерения.

Методика выбора и реализации диагностических признаков при оценке состояния сложных технических систем ЛА на земле и в полете с использованием системы встроенного контроля позволила обеспечить процесс диагностирования от постановки задачи и до получения результатов практического использования с разбиением на три этапа: 1 - этап физического анализа; 2 - этап математического анализа; 3 - этап технической реализации и позволила создать систему встроенного контроля, полностью обеспечивающую безопасность полета. Представлен обзор бортовых комплексов контроля космических и атмосферных ЛА.

Исследованы решения вопросов диагностики систем ПНК, связанных со спецификой решаемых комплексом задач. Определены общие подходы к решению частных задач синтеза динамических моделей диагностируемых систем и агрегатов ПНК. С общих позиций задачи диагностики можно свести к следующей постановке (Рис. 2).



Рис. 2. Алгоритм диагностики.

Аппаратные средства контроля и диагностики (АСКД), скомпонованные в единый проверочный комплекс, имеющий в своём составе все необходимые элементы, обеспечивающие формирование и подачу оптимального множества воздействий:  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ , на вход проверяемых систем и агрегатов ПНК и на вход, синтезированной в виде пространственно-временного образа, модели ПНК. Отрабатывая входные возмущения системы и агрегаты ПНК формируют множество:  $Y^r = \{y_1^r, y_2^r, y_3^r, \dots, y_m^r\}$  выходных параметров. Так же пространственно – временная модель, испытывая деформации, формирует множество:  $Y^{im} = \{y_1^{im}, y_2^{im}, y_3^{im}, \dots, y_m^{im}\}$ , являющееся идеальной реакцией, соответствующей полностью исправному ПНК. Далее множества  $Y_{im}$  и  $Y_r$  сравниваются в анализаторе, который выполняет операцию:  $Y_i^{im} - Y_i^r > A_i$ , где  $A_i$  – пороговое значение, заданное для

каждого контролируемого параметра технической документацией на объект контроля и диагностики. Рассмотрены способы формирования диагностических моделей контроля бортовых систем ЛА. Рассмотрены проблемы формирования диагностических признаков для оценки состояния объектов контроля. Определены общие подходы к решению частных задач синтеза динамических моделей.

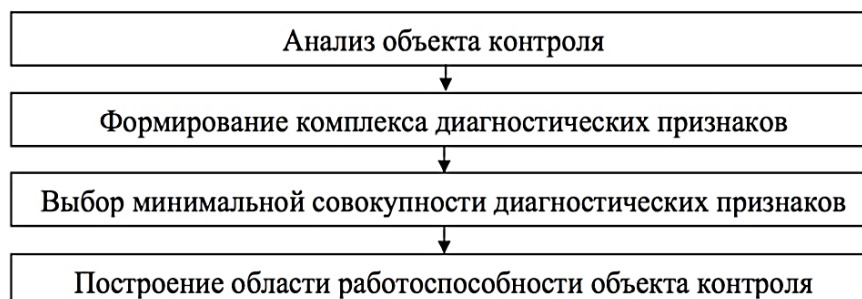


Рис. 3. Этапы построения диагностических моделей.

Основные этапы построения и анализа моделей диагностирования представлены на Рис. 3.

При решении задач диссертационного исследования предполагается, что вопросы сглаживания параметров, а также вопросы, связанные с дискретизацией по времени и по уровню, решены в системе сбора информации в соответствии с необходимыми техническими требованиями.

Представлены системы повышения отказоустойчивости и контроля, применяемые в атмосферных ЛА. Исследованы особенности этих систем, подходов и выявлены их недостатки. На основе проведенного анализа систем и их алгоритмического обеспечения сделан вывод о необходимости разработки универсального алгоритмического средства повышения отказоустойчивости и диагностики состояния современных измерительных комплексов и ПНК маневренных ЛА. В связи с этим обстоятельством сформулирована постановка задачи диссертационного исследования, которая заключается в разработке алгоритмов и систем повышения отказоустойчивости авионики современного ЛА в процессе полета.

**Во второй главе** посвящена исследованию измерительных комплексов и ПНК, а также алгоритмов обработки информации. Представлены структуры измерительных комплексов и ПНК современных маневренных атмосферных ЛА.

ПНК ЛА построены по принципу применения бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС) для решения комплексных задач, задач навигации, управления и взаимодействия с сохранением независимости работы отдельных входящих в комплекс систем.

Состав ПНК для конкретного типа ЛА определяется функциональными требованиями к нему и задачами, решаемыми ЛА. Датчики информации, входящие в ПНК, осуществляют измерение и первичную обработку исходных данных, а общие задачи интегральной обработки решает БЦВС.



Инерциальные навигационные системы (ИНС) в составе ПНК решают задачи непрерывного определения и выдачи потребителям пилотажно-навигационных параметров. Рассмотрены ИНС, включающие гиростабилизированную платформу (ГСП) с установленными на ней акселерометрами. При отказе ИНС, дополнительные автономные каналы в составе ПНК организованы на основе данных от СВС.

Основные корректирующие каналы в составе ПНК организованы на основе данных от СНС. При отказе СНС, дополнительные корректирующие каналы в составе ПНК организованы на основе данных от радиотехнических систем навигации, доплеровский измеритель скорости и сноса (ДИСС) и систем визуальной ориентации (ИКШ, нацеленный визир).

Введение в состав ПНК алгоритмов комплексной оценки обеспечивает коррекцию информации основных автономных систем – ИНС, СВС, а также эффективный контроль информации ДИСС и РСБН по более точным данным СНС и адаптацию измерителей к условиям полета. При этом достигается максимально возможная точность решения основных задач комплекса во всех режимах работы и условиях полета.

Системы авионики ЛА имеют погрешности, которые могут приводить к потере точности и работоспособности, снижают качество функционирования ЛА и точность выполнения поставленных задач. Рассмотрен алгоритм оценивания – адаптивный фильтр Калмана, который является одним из базовых алгоритмов системы контроля ПНК и оценивает погрешности измерительных систем.

Рассмотрено дискретное линейное уравнение, описывающее процесс изменения погрешностей ИНС.

$$x_k = \Phi_{k,k-1} x_{k-1} + \Gamma_{k-1} w_{k-1}, \quad (1)$$

где  $x_k$  – вектор состояния;  $w_{k-1}$  – вектор входного возмущения;  $\Phi_{k,k-1}$  – матрица объекта;  $\Gamma_{k-1}$  – матрица входа. Входные возмущения  $w_{k-1}$  предполагаются дискретным аналогом гауссовского белого шума с нулевым математическим ожиданием и неизвестной ковариационной матрицей.

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (2)$$

где  $z_k$  – вектор измерения;  $v_k$  – вектор измерительного шума;  $H_k$  – матрица измерения. Ошибки измерений  $v_k$  предполагаются дискретным аналогом гауссовского белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей  $R_k$ .  $E[v_j w_k^T] = 0$  при любых  $j$  и  $k$ .

Уравнения фильтра Калмана имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \Phi \hat{x}_{k-1} + K_k v_k \\ v_k &= z_k - H \Phi \hat{x}_{k-1} \\ P_{k/k-1} &= \Phi P_{k-1} \Phi^T + K_{k-1} v_k v_k^T K_{k-1}^T \end{aligned} \quad (3)$$

$$K_k = P_{k/k-1} H^T [H P_{k/k-1} H^T + R]^{-1}$$

$$P_k = (I - K_k H) P_{k/k-1}$$

где  $P_{k,k-1}$  – априорная ковариационная матрица ошибок оценивания;  $P_k$  – апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания;  $I$  – единичная матрица.

При помощи фильтра калмана осуществляется оценивание (восстановление) всего вектора состояния исследуемой системы.

Другими алгоритмами, которые используются для повышения точности ПНК являются эволюционные алгоритмы: генетический алгоритм (ГА), алгоритм самоорганизации и др. Алгоритмы самоорганизации – это многорядные алгоритмы, базирующиеся на гипотезе селекции. Необходимо решить систему нормализованных уравнений Гаусса:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N y_i = a_0 N + a_1 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) + a_2 \sum_{i=1}^N g_{1,j}(x_i) \\ \sum_{i=1}^N y_i g_{0,j}(x_i) = a_0 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) + a_1 \sum_{i=1}^N g_{0,j}^2(x_i) + a_2 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) g_{1,j}(x_i) \\ \sum_{i=1}^N y_i g_{1,j}(x_i) = a_0 \sum_{i=1}^N g_{1,j}(x_i) + a_1 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) g_{1,j}(x_i) + a_2 \sum_{i=1}^N g_{1,j}^2(x_i) \end{cases} \quad (4)$$

При введении в базис константы от свободного члена в уравнениях можно отказаться.

$$y_i = a_{0,j} g_{0,j}(x_i) + a_{1,j} g_{1,j}(x_i), j = 1 \dots C_N^2.$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N y_i g_{0,j}(x_i) = a_0 \sum_{i=1}^N g_{0,j}^2(x_i) + a_1 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) g_{1,j}(x_i) \\ \sum_{i=1}^N y_i g_{1,j}(x_i) = a_0 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) g_{1,j}(x_i) + a_1 \sum_{i=1}^N g_{1,j}^2(x_i) \end{cases} \quad (5)$$

Вычисления прекращаются, когда будет достигнут минимум используемого ансамбля критериев. Результатом является лучшая модель в последнем ряду. Полученная модель используется для прогноза и последующей коррекции в выходном сигнале ИНС ПНК ЛА.

**Третья глава** посвящена исследованию систем и алгоритмов повышения отказоустойчивости, диагностики и контроля.

Причиной недостоверности решения о работоспособности ПНК является погрешность измерения параметров, на основе которых выносится решение о работоспособности комплекса. В этом случае повышения степени достоверности достигают путем применения различных алгоритмов помехозащиты. Учитывая, что алгоритмическое обеспечение системы контроля и всего ПНК в целом должно отвечать ряду требований, таких как простота реализации в БЦВМ, робастность и

др. Задача синтеза алгоритмов помехозащиты, фильтров и других алгоритмов представляет собой также достаточно сложную задачу.

Посредством алгоритма оценивания проводится определение оптимальных оценок параметров, которые затем сравниваются с допусками и принимается решение по контролируемому параметру.

Рассмотрены алгоритмические методы, основанные на применении алгоритмов диагностики, помехозащиты, восстановления и прогнозирования.

Подход идентификации параметров модели с известной структурой позволяет сравнительно быстро получить достаточно достоверную модель исследуемого процесса, хотя достоверность в значительной степени зависит от искусства разработчика выбирающего структуру модели. Например, для моделирования скорости дрейфа ГСП применяется модель вида:

$$E_k = E_{k-1} - \beta T E_{k-1} + T A \sqrt{2} \beta W_{k-1}, \quad (6)$$

где  $E_k$  - скорость дрейфа ГСП,  $\beta$  - средняя частота изменения случайного дрейфа,  $A$  - среднеквадратическое отклонение случайного значения дрейфа,  $W_k$  - белый шум,  $T$  - период дискретизации.

На основе полученной модели определяется состояние исследуемого объекта, и в случае выхода параметров объекта за границы допуска проводится восстановление.

Как в случае плавного выхода параметров за границы допуска, так и в случае резких сбоев восстановление проводится путем подстройки коэффициентов или параметров алгоритмического обеспечения ПНК. Выявление неприемлемого уровня погрешностей осуществлено системой с использованием алгоритма самоорганизации. Восстановление работоспособности системы проведено с помощью регулятора структуре ИНС или прогноза и последующей компенсацией погрешностей в выходном сигнале ИНС.

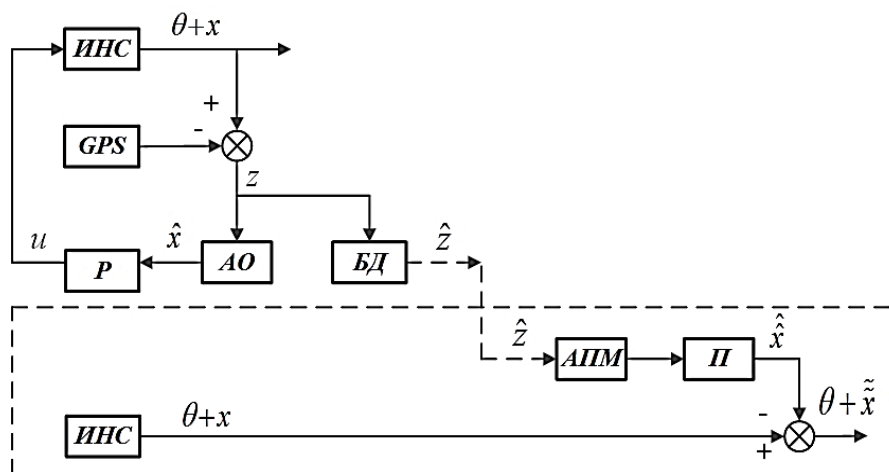


Рис. 4. Измерительный комплекс с функцией регенерации:

$\Theta$  - истинная навигационная информация;  $x$  - погрешности ИНС;  $z$  - вектор измерений;  $\hat{z}$  - измерительная выборка, АО - алгоритм оценивания; АПМ - алгоритм построения моделей; БД - база данных; П - алгоритм прогноза, Р -

регулятор;  $\hat{X}$  – оценка вектора погрешностей ИНС;  $\hat{\hat{x}}$  – прогноз погрешностей ИНС;  $\tilde{x}$  – ошибка прогнозирования;  $u$  – вектор управления.

Для диагностики нелинейных моделей ПНК ЛА использован алгоритм построения прогнозирующей модели погрешностей с использованием ГА и алгоритма самоорганизации.

Прогнозирующая самоорганизующаяся модель имеет вид:

$$\phi(x) = \sum_{i=1}^N a_i \mu_{ni}(f_i x) \quad (7)$$

Здесь  $n$  – число базисных функций в модели;  $\mu_n$  – базисные функций из параметризованного множества  $F_p$ .  $F_p = \{a_i \mu_i(f_i x) | i = 1, L\}$ , набор базисных функций. Каждой базисной функции ставится в соответствие двухмерный вектор параметров  $(a, f)^T$ , где  $a$  – амплитуда,  $f$  – частота.

**В четвертой главе** представлены оригинальные системы повышения отказоустойчивости ПНК ЛА. Предложена структура системы с использованием теории функциональных систем П.К. Анохина и ДЭС.

Предложена структура редуцированной ДЭС с интеллектуальной компонентой, в качестве которой использован акцептор действия, включающий алгоритмы оценивания, построения моделей, прогнозирования и сравнения результата. Структура ДЭС с интеллектуальной компонентой представлена на Рис.5.

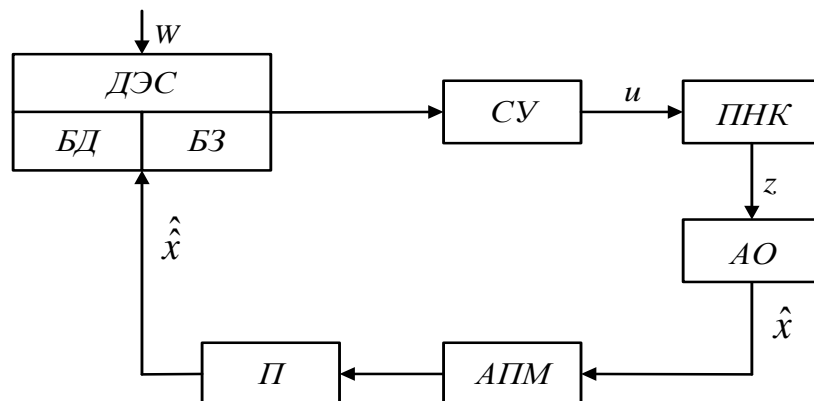


Рис. 5. Структура редуцированной ДЭС с интеллектуальной компонентой.

На Рис. 5 введены следующие обозначения: СУ – система управления; БЗ – база знаний;  $w$  – вектор внешних возмущений;  $\hat{x}$  – оценка редуцированного вектора состояния ПНК;  $\hat{\hat{x}}$  – редуцированный вектор прогнозных значений состояния ПНК.

ДЭС ЛА работает на основе информации БД и БЗ. Информация о результатах функционирования ПНК ЛА поступает в БД, где выполняется первоначальная обработка данных для обеспечения эффективного построения моделей, выявление и отсеивание аномальных измерений, формирование измерений в выборках и т.д. В БД информация сохраняется в упорядоченной форме в двух частях памяти – долгосрочной и краткосрочной памяти. В долгосрочной памяти сохраняются шаблоны, т.е. совокупность данных,



соответственно четко обусловленному режиму функционирования ЛА и прогнозирующие модели, используемые для конкретных условий полета. В краткосрочной памяти сохраняются все динамические данные, которые оперативно обновляются при поступлении новых измерений.

Предварительно обработанные в ПНК выборки поступают в акцептор действия, где происходят оценивание ключевых параметров ПНК, построение прогнозирующих моделей и прогноз его состояния, а также сличение результатов прогноза с реальными результатами действия.

Полученные прогнозирующие модели используются для получения прогнозных значений ключевых параметров ПНК. Результаты прогноза поступают в БЗ, где сравниваются со значениями, установленными для выполняемого режима функционирования ЛА. Также прогнозными значениями ключевых параметров ПНК пополняются БД ДЭС. С ДЭС информация о будущих нарушениях функционирования ПНК передается в СУ для формирования управляющего воздействия на ПНК.

Предложена система повышения отказоустойчивости ПНК с функцией восстановления (Рис.6).

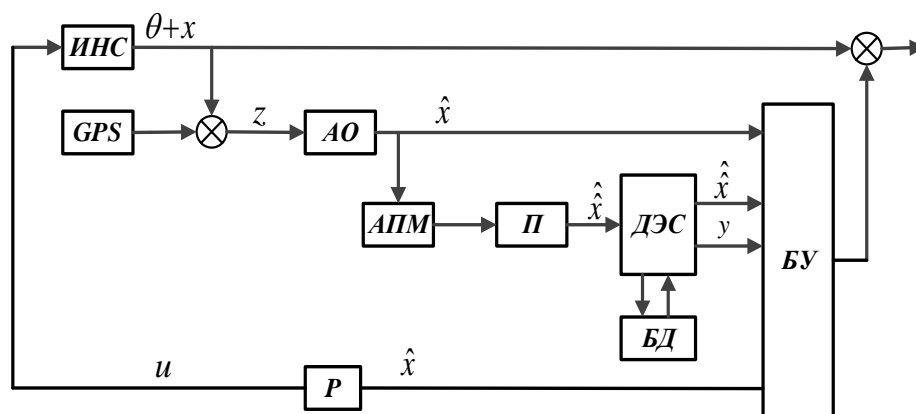


Рис.6. Система повышения отказоустойчивости ПНК с функцией восстановления.

На Рис. 6: БУ – блок управления коррекцией;  $y$  – управляющий сигнал ДЭС. Диагностируются превышения пороговых значений погрешностей ИНС, парирование которых позволяет удерживать ИНС в области достоверных значений навигационной информации ЛА, предотвратив развитие ситуации, приводящей к потере работоспособности ПНК. При реализации системы контроля использована структура ДЭС С-PRIZ и FDI-метод, предполагающий использование нечеткой логики. Предполагается использование данных из БД испытаний ПНК, которые подаются на вход математической модели, а затем векторы выходных параметров модели сравнить с данными испытаний. В результате получается вектор отклонений, анализ которого базой нечетких правил ДЭС формирует соответствующее диагностическое решение о фактическом состоянии ПНК. Элементы нечеткой логики применяются совместно с методом диагностических матриц (матриц Л.А. Урбана).

Модели в векторной форме имеют следующий вид:

$$\overrightarrow{\delta x} = A^{-1} \cdot B \cdot \overrightarrow{\delta y}, \quad (8)$$

где  $\overrightarrow{\delta x}$  - вектор параметров состояния ПНК;  $\overrightarrow{\delta y}$  - вектор диагностических признаков, относительных отклонений измеряемых параметров ПНК;  $B$  и  $A$  - матрицы коэффициентов, позволяющие устанавливать количественную взаимосвязь указанных параметров на определенных режимах работы ПНК. Диагностическая матрица конкретной ПНК на определенном режиме представляет собой таблицу численных значений коэффициентов  $a_{ij}$  и  $b_{ij}$ , позволяющих по отклонениям ряда измеряемых параметров  $\delta y_{ij}$  определять отклонения непосредственно не измеряемых параметров состояния  $\delta x_{ij}$ . Представлена методика наполнения БД, в которую помимо текущих измерений, включены прогнозные значения анализируемых параметров ПНК. ДЭС с алгоритмом построения прогнозирующих моделей, методом диагностических матриц и правил нечеткой логики позволяет определять степень достоверности навигационной информации ЛА, а блок принятия решений, регулятор восстанавливают работоспособность ПНК, использование оценок и прогнозных значений погрешностей ИНС повышает достоверность навигационной информации ЛА.

**Пятая глава** посвящена экспериментальным исследованиям. Проведено моделирование тестовой математической модели погрешностей горизонтального канала базовой системы ПНК - ИНС. Представлены результаты работы алгоритма диагностики погрешностей ИНС. На Рис.7,8 представлены погрешность ИНС в определении скорости, скорость дрейфа ГСП, оценки адаптивным фильтром Калмана, а с момента T1 - прогноз, полученный с помощью ГА. При моделировании для получения погрешности ИНС использована тестовая математическая модель. Так как в реальных условиях имеется информация об оценке, то она используется для диагностики состояния ПНК. Предложено использовать прогноз погрешности ИНС, чтобы заранее выявить момент выхода систем из зоны устойчивой работы.

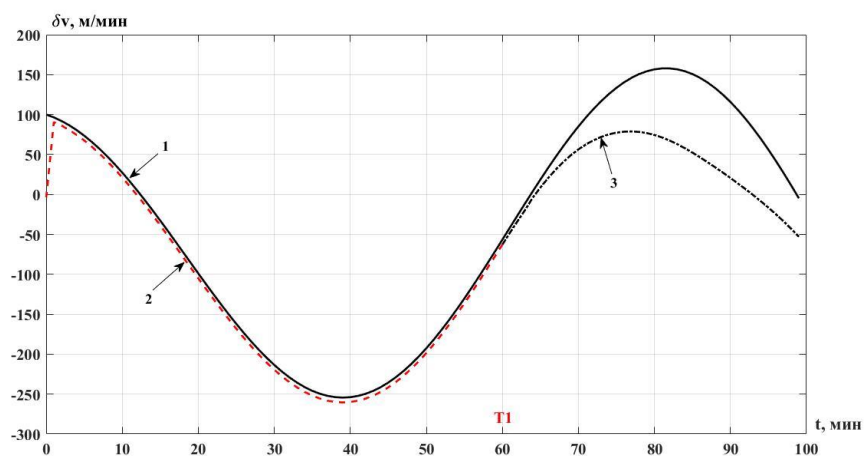


Рис.7. Погрешность ИНС в определении скорости, ее оценка адаптивным фильтром Калмана и прогноз.

На Рис.7 обозначено: 1-погрешность ИНС в определении скорости; 2- оценка погрешности ИНС фильтром Калмана; 3- прогноз погрешности ИНС.

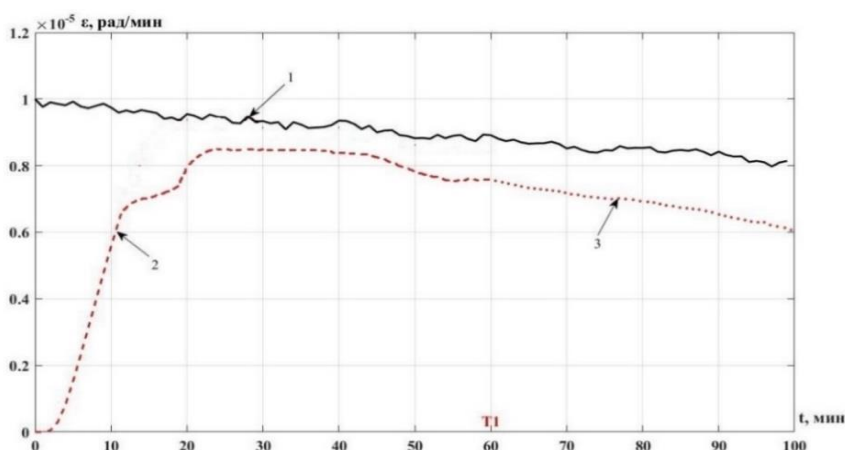


Рис.8. Скорость дрейфа ГСП, ее оценка адаптивным фильтром Калмана и прогноз.

На Рис.8 обозначено: 1- модель скорости дрейфа ГСП; 2- оценка скорости дрейфа ГСП адаптивным фильтром Калмана; 3- прогноз скорости дрейфа ГСП.

На основе оценок, полученных адаптивным фильтром Калмана, с помощью алгоритма самоорганизации или ГА строится модель погрешностей ИНС и с момента времени  $T_1$  осуществляется прогноз. Выход значений прогноза из зоны устойчивой работы ИНС, определенной априорно, сигнализирует о возможной потере работоспособности системы - достоверность навигационной информации снижается.

Применение ДЭС значительно повышает эффективность диагностирования ПНК ЛА, так как позволяет оперативно анализировать разнообразную информацию по особенностям складывающейся ситуации и принимать решения по эксплуатации данного ПНК.

Результат работы системы повышения отказоустойчивости ПНК с функцией восстановления представлен на Рис. 9.

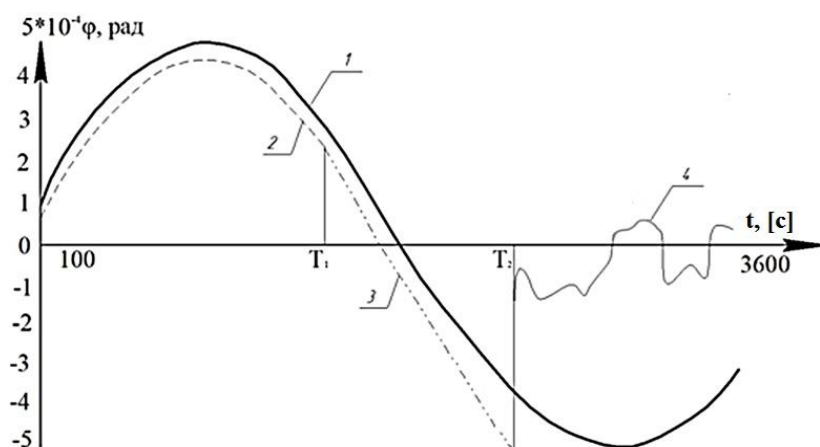


Рис. 9. Угол отклонения ГСП относительно сопровождающего трехгранника, его оценка адаптивным фильтром Калмана, прогноз и погрешность ИНС с регулятором.

На Рис. 9 обозначено: 1 – математическая модель изменения угла отклонения ГСП относительно сопровождающего трехгранника; 2 – оценка угла отклонения ГСП адаптивным фильтром Калмана; 3 – прогноз угла отклонения ГСП; 4 – изменение угла отклонения ГСП при коррекции в структуре ИНС.

На основе прогноза погрешностей ИНС ПНК ЛА в момент времени T2 принимается решение о переключении рабочего контура коррекции (на интервале T1-T2 использована коррекция в выходном сигнале ИНС, а с момента T2 использована коррекция в структуре ИНС с помощью регулятора). По сравнению с ИНС ПНК использование ИНС с разработанной системой в стохастических условиях позволяет повысить точность по результатам математического моделирования в среднем на 8-11%.

Исследованы особенности решения задач повышения отказоустойчивости ПНК с использованием нечеткой ДЭС, процесс формирования БД, а также реализация FDI-метода. Построена диагностическая матрица ДЭС.

Формирование базы нечетких правил осуществляется на основе диагностической матрицы, строки которой легли в основу создания БЗ и функций принадлежности соответствующих лингвистических переменных.

Для 1%-го отклонения оценки скорости дрейфа ГСП, используя базу нечетких правил ДЭС, а также операцию пересечения нечетких множеств, получаем:

$$\min \left( \begin{array}{l} \mu_z(\Delta T_2^{(k)}) \& \mu_z(\Delta P_4^{(k)}) \\ \& \mu_z(\Delta P_6^{(k)}) \& \mu_z(\Delta F_c^{(k)}) \end{array} \right) \rightarrow 0,84 \quad (9)$$

Это означает, что достоверность принятия решения об исправности ИНС составляет 0,84. Для строки диагностической матрицы, соответствующей 3 % отклонению оценки скорости дрейфа ГСП, получим:

$$\min (\mu_{z_{\epsilon_i}}) \rightarrow 0,59 \quad (10)$$

Достоверность принятия решения об исправности ИНС составляет 0,59, а для ее неисправного состояния коэффициент доверия будет 0,24. Данные величины говорят о том, что есть высокая вероятность выхода ИНС из зоны устойчивой работы.

Результаты анализа ДЭС совпадают с результатами исследований, проведенных в ходе стендовых испытаний ИНС.

Результаты математического моделирования продемонстрировали работоспособность разработанных алгоритмов. Анализ результатов математического моделирования показал, что разработанное алгоритмическое обеспечение систем повышения отказоустойчивости позволяют повысить эффективность навигационных систем и ПНК ЛА за счет заблаговременного



выявления момента, когда информация становится недостоверной и удержания ПНК в зоне устойчивой работы.

**В заключении** содержит перечень основных новых результатов диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. На основе проведенного системного анализа выявлены недостатки и намечены пути совершенствования систем повышения отказоустойчивости с использованием ДЭС и элементов теории интеллектуальных систем.
2. Разработана структура системы регенерации измерительного комплекса в составе ПНК, которая позволяет реализовать функцию восстановления работоспособности комплекса с помощью коррекции посредством эволюционного алгоритма и регулятора. Система легко реализуется в серийных БЦВМ современных маневренных атмосферных ЛА.
3. Создан комплекс алгоритмов диагностики бортовой аппаратуры, применяемый в ДЭС для перспективного ЛА включающий алгоритмы оценивания, построения моделей определяющих параметров, прогнозирования и контроля. Для оценивания и прогнозирования состояния гироскопов используются априорные модели, алгоритмы идентификации и эволюционные алгоритмы построения прогнозирующих моделей. Разработанные алгоритмы позволяют вычислять прогнозные значения погрешностей систем авионики ЛА и предотвратить выход из диапазона устойчивой работы.
4. Разработана система повышения отказоустойчивости ПНК, включающая редуцированную ДЭС с интеллектуальной компонентой в виде акцептора действия, отличающаяся компактностью за счет анализа только ключевых параметров ПНК и простотой реализации в современных БЦВМ.
5. Разработана система повышения отказоустойчивости ПНК ЛА с рациональной структурой на основе нечеткой ДЭС. Разработанная структура ДЭС и комплекс алгоритмов обеспечивают работоспособность и отказоустойчивость оборудования ЛА и позволяют получать достоверную информацию о параметрах ЛА.

**Перспективы дальнейшей разработки** темы связаны с развитием интеллектуальных технологий в структуре редуцированной ДЭС и исследованием других алгоритмов построения прогнозирующих моделей в алгоритмическом обеспечении системы авионики ЛА.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Пролетарский А.В., Чжо Зин Хтут. Система диагностики бортовых измерительных средств // Автоматизация. Современные технологии, 2016. № 1. С.25 – 28. (1 п.л / 0.5 п.л)
2. Чжо Зин Хтут., Селезнева М.С., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Система контроля прицельно навигационного комплекса ЛА // Автоматизация. Современные технологии, 2017. Т. 71. № 7. С.314-318. (1 п.л / 0.25 п.л)

3. Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Чжо Зин Хтут. Редуцированная динамическая экспертная система с интеллектуальной компонентой для контроля прицельно-навигационного комплекса ЛА // Автоматизация. Современные технологии, 2017. Т. 71. № 8. С.356 - 360. (1.2 п.л / 0.4 п.л)
4. Пролетарский А.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Чжо Зин Хтут, Шашурин В.Д., Лукьянова Н.В. Система контроля прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата. Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2018. №2 (44). С. 24 – 27. (1.3 п.л./0.3 п.л.)
5. Чжо Зин Хтут., Неусыпин К.А. Система контроля прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата. // Будущее машиностроения России. Сборник докладов Десятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. Москва: 2017. С.602-607. (0.25 п.л / 0.1 п.л)
6. Чжо Зин Хтут., Клычников В.В. Контроль технического состояния навигационного комплекса // Сборник статей X международной научно-практической конференции «Eurasia Science», Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2017. С.29-31. (0.3 п.л / 0.15 п.л)
7. Чжо Зин Хтут. Аппаратная реализация системы диагностики состояния измерительной аппаратуры летательного аппарата // Экономика, Управление, Техника: Проблемы и Перспективы Развития. Труды международной научно-практической конференции. 2016. С.5-7. (0.2 п.л / 0.2 п.л)
8. Чжо Зин Хтут. Диагностическая экспертная система определения неисправностей авиационных систем // Экономика, Управление, Техника: Проблемы и Перспективы Развития. Труды международной научно-практической конференции. 2016. С.15-17. (0.3 п.л / 0.3 п.л)
9. Чжо Зин Хтут., Оглоблина Ю.С., Губарев Ф.Н. Различные модификации генетических алгоритмов // Достижения вузовской науки. Труды II Международной научно-практической конференции. 2016. С.137-140. (0.25 п.л / 0.1 п.л)
10. Чжо Зин Хтут. Разработка интеллектуальной системы для диагностики вычислительных средств // Современные аспекты фундаментальных наук. Труды второго международного симпозиума. 2015. С.230-233. (0.3 п.л / 0.3 п.л)
11. Чжо Зин Хтут. Экспертная система диагностики бортовых вычислительных средств // Будущее машиностроения России. Сборник докладов Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Москва: 2015. С.1130-1131. (0.2 п.л / 0.2 п.л)