

Конкурс «Авиастроитель года» по итогам 2024 г.
Номинация: «За лучший инновационный проект».

Конкурсная работа

**«Интеллектуальная система обеспечения отказоустойчивости комплекса
бортового оборудования сверхзвукового пассажирского самолета»**

Введение

Создание интеллектуальной системы обеспечения отказоустойчивости комплекса бортового оборудования (далее – КБО), способной быстро и достоверно выявлять любые аномалии в работе оборудования и автоматически эффективно компенсировать их последствия, является одним из приоритетных направлений при разработке перспективного сверхзвукового пассажирского самолета (далее – СПС). Разработка такой интеллектуальной системы, основанной на бионической аналогии с нервной системой человека, выполнялась в рамках Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» по направлению научных исследований «Искусственный интеллект и безопасность полетов» по заказу Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В 2024 году разработан прототип интеллектуальной системы обеспечения отказоустойчивости КБО СПС, и успешно проведены экспериментальные исследования, подтверждающие работоспособность и эффективность предложенных решений.

Назначение технологии

Интеллектуальная система обеспечения отказоустойчивости КБО СПС предназначена для повышения безопасности полета СПС путем непрерывного диагностирования технического состояния и автоматической реконфигурации КБО при возникновении отказов исполнительной, вычислительной и измерительной подсистем.

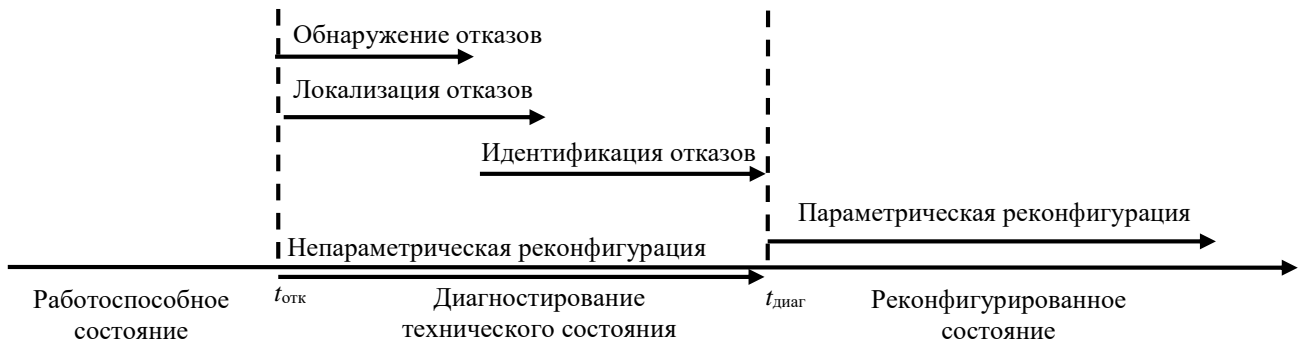


Рисунок 1. Назначение интеллектуальной системы обеспечения отказоустойчивости КБО СПС

Решаемые задачи

Система имеет трехуровневую гибридную архитектуру, в которой задачи диагностирования и реконфигурации каждой подсистемы решаются с использованием мажоритарной логики принятия решений по результатам работы трех принципиально разнородных алгоритмических контуров, использующих методы, основанные на моделях, данных и знаниях.

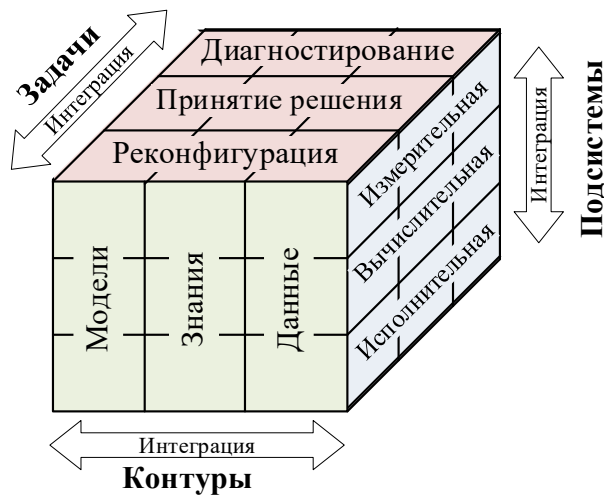


Рисунок 2. 3D-куб решаемых задач

Диагностирование технического состояния подсистем осуществляется путем решения задач обнаружения, локализации и идентификации возникающих в них отказов.

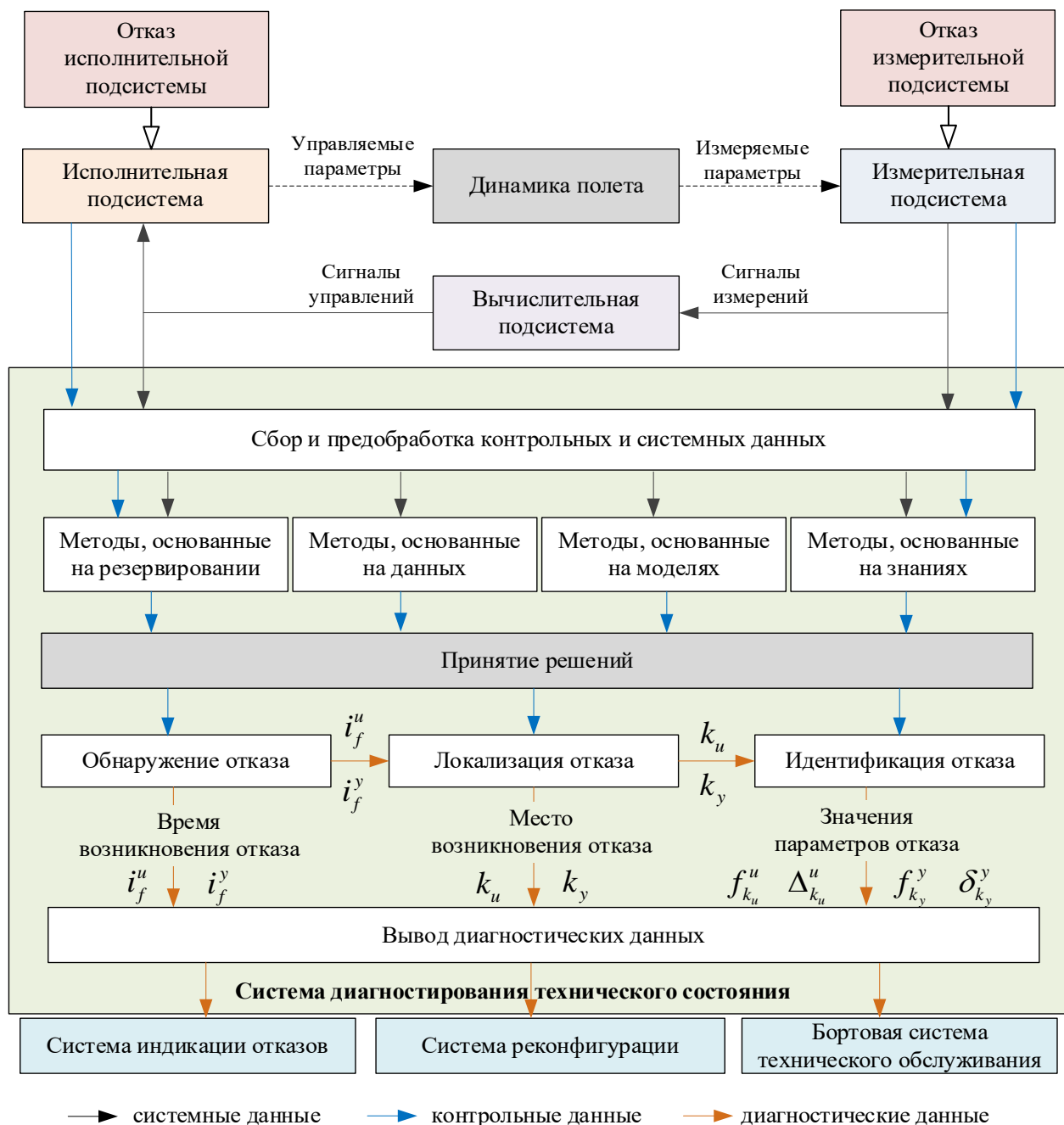


Рисунок 3. Система диагностирования технического состояния КБО СПС

До окончания процесса диагностирования для частичной компенсации последствий отказов осуществляется непараметрическая реконфигурация КБО путем непрерывной коррекции измерительных и управляющих сигналов.

По результатам диагностирования включается режим безударной параметрической реконфигурации отказавших подсистем для полного восстановления работоспособного состояния КБО.

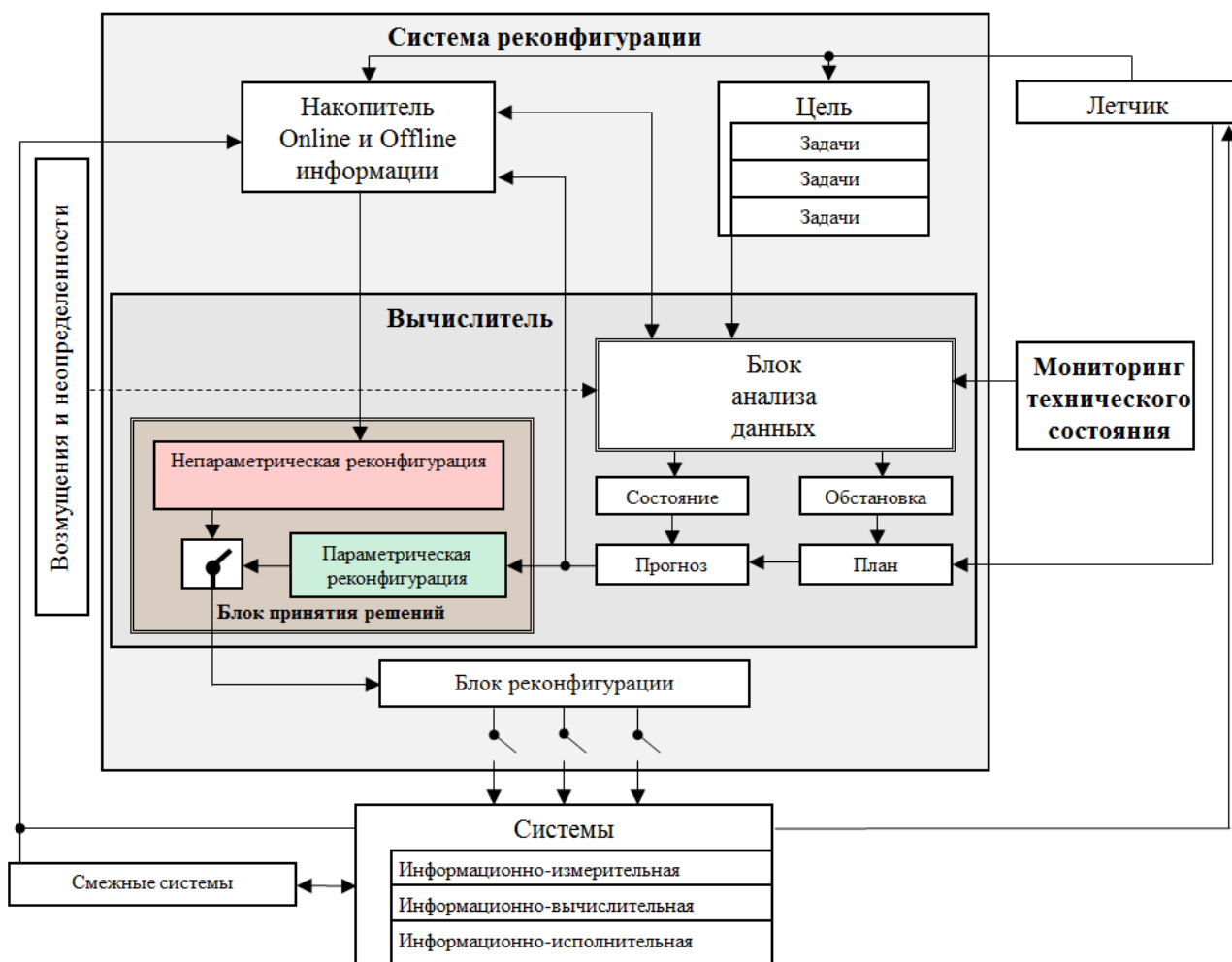


Рисунок 4. Система реконфигурации КБО СПС

Научная новизна интеллектуальной системы обеспечения отказоустойчивости КБО СПС описана в Приложении 1, а ключевые ноу-хау, используемые в этой системе, представлены в Приложении 2.

Заключение

Интеллектуальная система обеспечения отказоустойчивости КБО СПС, использующая бионическую аналогию с нервной системой человека, гармонично сочетает в себе как проверенные временем классические методы параметрической теории систем, основанные на моделях, так и новые, непараметрические методы, основанные на данных и знаниях.

Экспериментальные исследования прототипа системы, проведенные на подробной математической модели движения пассажирского самолета с комплексной системой управления, показали, что интеллектуальная система обеспечения отказоустойчивости позволяет своевременно обнаруживать, достоверно локализовывать, идентифицировать и эффективно компенсировать широкий спектр как постепенных, так и внезапных множественных отказов измерительной, исполнительной и вычислительной подсистем КБО СПС, в том числе при их неидентифицируемости и нестационарности, наличии нелинейностей и линейных обратных связей, возмущений и непараметрических неопределенностей. Внедрение разработанной системы позволит устранить избыточное аппаратное резервирование, применяемое в современных КБО, снизить требования к насыщенности управления при одновременном сохранении требуемых характеристик управляемости и устойчивости СПС.

Новые научные идеи, архитектурные, методологические и технические решения, лежащие в основе интеллектуальной системы обеспечения отказоустойчивости КБО СПС, носят универсальный характер и имеют далеко идущие перспективы. Они также обладают значительным потенциалом для решения других задач динамики, таких как прогнозирование траекторий, предотвращение столкновений и управления движением не только СПС, но и других перспективных гражданских воздушных судов, космических аппаратов самолетного типа, гибридных аппаратов типа «самолет-амфибия», беспилотных летательных аппаратов самолетного, вертолетного или мультироторного типа.

Научная новизна

Научная новизна решений, примененных при создании интеллектуальной системы обеспечения отказоустойчивости КБО СПС, состоит в следующем:

1. Предложена новая трехконтурная бионическая программно-алгоритмическая архитектура интеллектуальной системы обеспечения отказоустойчивости КБО СПС, использующая эффективное сочетание методов диагностирования технического состояния и реконфигурации, основанных на моделях, данных и знаниях.

2. Разработаны новые методы диагностирования технического состояния и реконфигурации измерительных и исполнительных подсистем КБО СПС, основанные на данных, которые выводятся из условий разрешимости матричных уравнений идентификации только на основе анализа известных входных и выходных сигналов. Для эффективной работы методов не требуется информация о параметрах модели динамики СПС или его КБО, поэтому они не подвержены влиянию модельных ошибок.

3. Методы обнаружения и локализации отказов, основанные на данных, легли в основу внешних систем контроля, применение которых позволило решить проблему неконтролепригодности дублированных систем при возникновении модельных отказов во встроенных системах контроля, повторяя принципы, заложенные природой в организмах человека и большинства живых существ.

4. Предложен новый подход к обеспечению непрерывности процессов диагностирования технического состояния и безударности включения режима реконфигурации. Во всех алгоритмах после обнаружения и идентификации очередного отказа выполняется обновление параметров в соответствии с полученной информацией. При этом для продолжения диагностирования технического состояния и реконфигурации не требуется заново накапливать данные о входных и выходных сигналах измененной в результате отказа системы. Это исключает эффект запаздывания алгоритмов после возникновения очередного отказа.

5. Для повышения достоверности и надежности работы алгоритмов диагностирования и реконфигурации использованы новые принципы контроля плохой обусловленности входо-выходных матриц Ганкеля (по числу обусловленности и на основе сингулярной аппроксимации), введен динамический контроль ширины окна с данными, скорректированы условия «подключения» алгоритмов к объекту. Это позволило исключить случаи, когда «подключение» не происходит или пропадает в процессе диагностирования и реконфигурации.

6. За счет разделения измерительных каналов с использованием теоремы Кэли – Гамильтона, а также учета индекса наблюдаемости и отказа от восстановления полного вектора состояния, существенно повышена эффективность алгоритмов диагностирования технического состояния измерительной подсистемы. Это позволило сократить время «подключения» к объекту, повысить быстродействие, обеспечить идентификацию множественных отказов и работу с не полностью наблюдаемыми системами.

7. Для возврата к штатной динамике полета СПС после отказа в исполнительной подсистеме предложен новый подход к решению обратной задачи динамики, согласно которому выход на заданную динамику полета осуществляется не за один, а за несколько дискретных шагов в соответствии с индексом управляемости системы.

8. В качестве альтернативы многошаговому возврату к штатной динамике полета СПС после отказа в исполнительной подсистеме, предложены схемы получения динамики, приближенной к штатной, и достижимой на каждом дискретном шаге, независимо от индекса управляемости системы. При этом осуществляется условная оптимизация достижимой динамики при ограничениях реконфигурированных управляющих сигналов, вызванных возможностями их реализации работоспособными приводами.

Предложен новый способ уменьшения нормы реконфигурированных управлений в рамках одного дискретного шага, как через псевдообращение матрицы управления, так и через последовательное определение столбцов ее правого аннулятора максимального ранга только на основе данных.

Ключевые ноу-хау

Эффективная реализация комплексного подхода к интеграции методов, основанных на моделях, знаниях и данных, позволила синтезировать интеллектуальную систему обеспечения отказоустойчивости КБО СПС в соответствии с бионической аналогией с нервной системой человека, базирующейся на трехслойной (триединой) модели мозга (triune brain model), которая включает в себя:

- примитивный (нижний, древний, глубинный, рептильный) мозг (мозговой ствол, базальное ядро, мозг выживания);
- эмоциональный (средний, промежуточный) мозг (лимбическая система);
- рациональный (высший, неомагилярный) мозг (мозг неомлекопитающих, неокортекс).

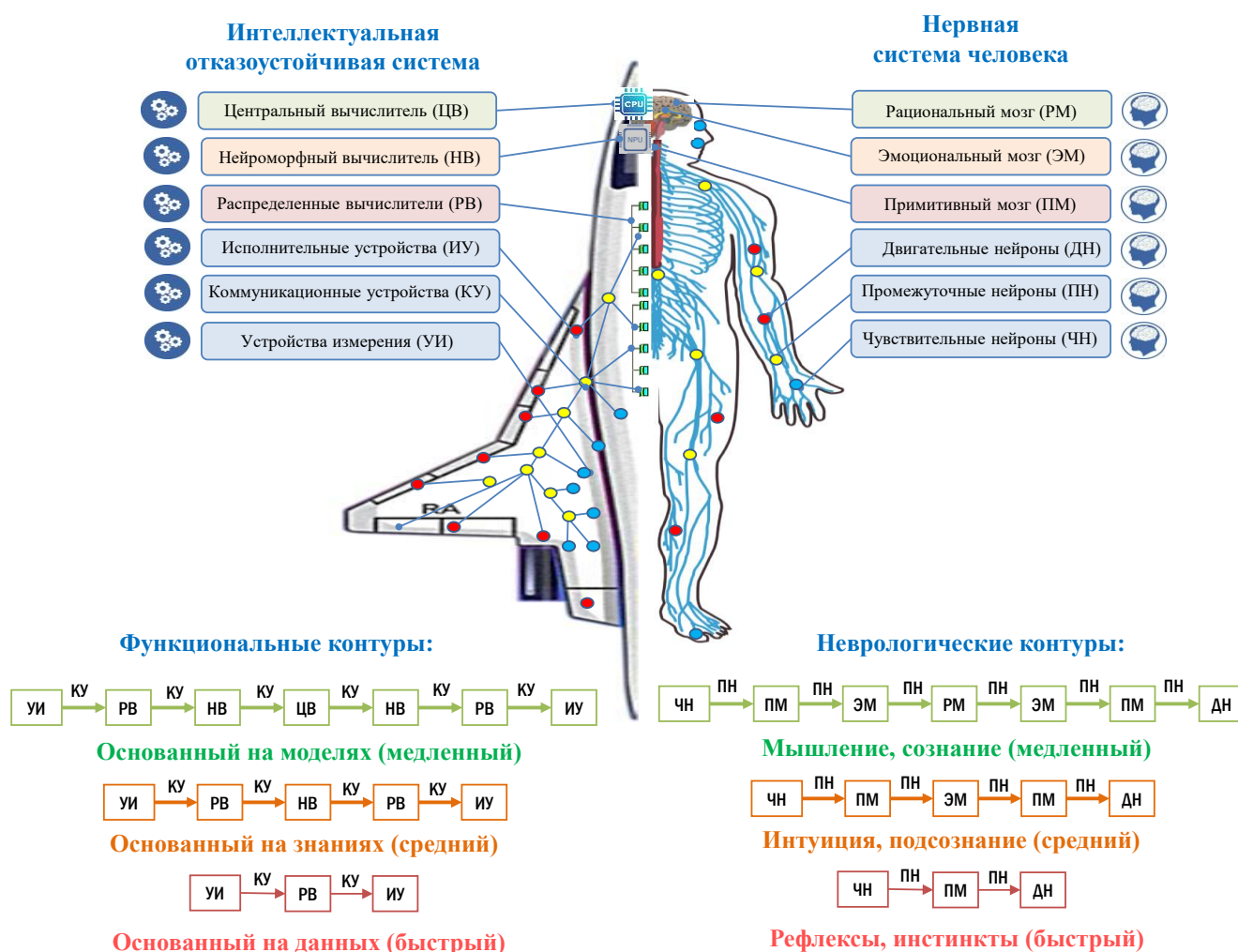


Рисунок 5. Бионическая аналогия интеллектуальной отказоустойчивой системы и нервной системы человека

Если рассматривать КБО СПС, как некоторый технический аналог живого организма, в частности, человека, то всем его элементам можно сопоставить соответствующие функциональные аналоги его нервной системы. Например, устройства измерения соответствуют чувствительным нейронам, коммуникационные устройства – промежуточным нейронам, а исполнительные устройства – двигательным нейронам.

Тогда, если рассматривать вычислительную подсистему отказоустойчивой системы в виде мозга человека, то в зависимости от используемых методов диагностирования технического состояния и реконфигурации можно в явном виде выделить и сопоставить с рефлекторными дугами нервной системы человека три принципиально различных функциональных контура разработанной интеллектуальной системы:

- основанный на моделях (*медленный*), использующий центральный вычислитель и функционально соответствующий сознательному или логическому мышлению человека, за который отвечает рациональный мозг;

- основанный на знаниях (*средний*), использующий нейроморфный вычислитель и функционально соответствующий интуиции или образному мышлению человека, за которые отвечает эмоциональный мозг;

- основанный на данных (*быстрый*), использующий распределенные вычислители и функционально соответствующий условным и безусловным рефлексам человека, за которые отвечает примитивный мозг.

Гибридный подход к диагностированию технического состояния и реконфигурации КБО СПС, эффективно сочетающий методы, основанные на моделях, знаниях и данных, лишен ограничений, присущих отдельным методам, но при этом обладает всеми их преимуществами.

Разработанная система является легко масштабируемой, ее функционирование не вызывает долгосрочную повышенную нагрузку на вычислительную подсистему и позволяет обеспечивать отказоустойчивость КБО СПС в полете в режиме реального времени даже в условиях полной параметрической неопределенности.