

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ НЕОБСЛУЖИВАЕМЫХ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВИАЦИИ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

Среди главных задач развития комплексов бортового оборудования (КБО) самолётов транспортной категории видное место занимает достижение высокой эффективности и конкурентоспособности на отечественном и мировом рынках за счёт:

- радикального повышения надёжности и отказоустойчивости КБО,
- повышения безопасности полётов (снижения количества лётных инцидентов),
- снижения простоев летательных аппаратов, повышения их готовности к штатному применению,
- снижения стоимости эксплуатации,
- обеспечения широкого диапазона функциональных возможностей.

Предлагаемый подход к построению архитектуры КБО на основе концепции управляемой избыточности нацелен на создание технологии разработки высоконадежных и живучих КБО, которая позволила бы существенно снизить расходы на техническое обслуживание и обеспечить повышенную готовность и функциональную адаптацию к условиям полёта за счёт рационального использования располагаемых ресурсов и системных возможностей комплекса.

Решение указанных задач происходит в контексте общих тенденций в авионике, связанных, во-первых, с переходом от централизованных и федеративных решений в архитектуре КБО к интегрированным структурам на базе распределенной модульной электроники (РМЭ), во-вторых, с глубоким внедрением принципов интегрированной модульной авионики (ИМА) и, в-третьих, с продвижением развиваемой за рубежом концепции интегрированного управления исправностью транспортного средства (Integrated Vehicle Health Management – IVHM) в интересах рационализации технического обслуживания АТ за счёт заблаговременного восстановления её работоспособности до наступления отказа.

Концепция использования избыточности бортовых комплексов

Кардинальный путь общего увеличения эффективности авиационной транспортной системы, снижения времени и стоимости обслуживания воздушных судов, включая их КБО, видится сегодня в дальнейшем развитии концепции ИМА и придании авионике и комплексу БРЭО в целом, на основе использования естественной или преднамеренной созданной избыточности и системных свойств комплекса, свойств «необслуживаемости», т.е. возможности автоматического самовосстановления без участия персонала за счет реконфигурирования систем и компонентов.

Концепция авионики необслуживаемого бортового оборудования (АНБО) была предложена АО «НИИАО». Её философия, в отличие от концепции IVHM, подразумевает исключение необходимости в обслуживании комплекса в межрегламентные периоды. Сохранение требуемых эксплуатационно-технических характеристик должно обеспечиваться автоматическим мониторингом и диагностированием технического состояния, а также наличием активных средств реконфигурирования, позволяющих изменять структуру комплекса для сохранения его функций в случае отказов и адаптировать ее к текущему состоянию и внешним условиям.

Современная архитектура ИМА основывается прежде всего на принципах независимого использования общих ресурсов вычислительной платформы в интересах различных целевых функций и открытой сетевой архитектуры (с уменьшением доли «жестко» установленных связей между компонентами комплекса). Реализация этих принципов создаёт увеличения общей надежности функций авионики за счёт реконфигурирования при отказах в виде перераспределения приложений между вычислителями, в том числе резервными.

Конечная задача проекта АНБО состоит в создании замкнутой технологии проектирования, выпуска, поддержки на протяжении жизненного цикла и дальнейшего совершенствования отказоустойчивых КБО с бортовой интегрированной вычислительной средой (БИВС), в которой в режиме реального времени реализуются эффективные

алгоритмы и процедуры мониторинга технического состояния и реконфигурирования бортового оборудования.

Принципы создания избыточных бортовых систем

На рис. 1 представлена структура КБО современного магистрального самолета с избыточностью всех подсистем комплекса. При разработке таких КБО актуальными становятся вопросы проектирования и интеграции разнородных избыточных ресурсов для выполнения единых целей функционирования в условиях реального времени, совокупности внешних неопределенных факторов, кроме того, в условиях жестких массогабаритных и энергетических ограничений.

В работах специалистов АО «НИИАО» определены ключевые принципы создания интегрированных платформ для КБО, удовлетворяющих современным требованиям:

- избыточность элементов платформы,
- обнаружение и идентификация аппаратных и программных ошибок,
- локализация (парирование маскированием) аппаратных и программных ошибок,
- автоматическое восстановление (парирование реконфигурированием) отказов, а также устойчивых и перемежающихся сбоев.

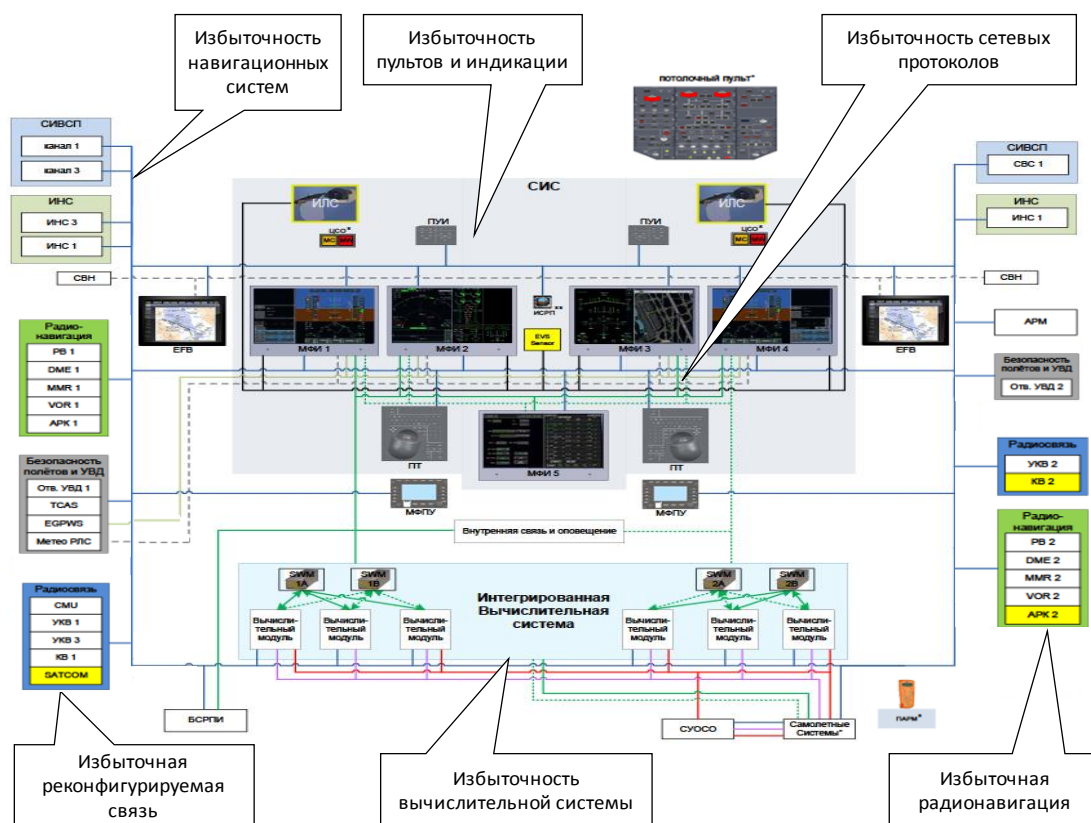


Рис. 1. Примеры избыточности в современном комплексе бортового оборудования

Удовлетворение этим требованиям, большой объем возложенных на КБО задач, а также сложность управления разнородным избыточным оборудованием остро ставит вопрос о развитии подходов к управлению избыточностью бортовых комплексов, в первую очередь методов экономичного и эффективного резервирования.

Концепция управляемой избыточности

Согласно общепринятому определению, избыточностью технической системы называется наличие в ней возможностей сверх тех, которые могли бы обеспечить ее нормальное функционирование. Различают «дикую» избыточность, возникающую как результат неоптимального или нерационального проектирования и подлежащую

безусловной минимизации, и преднамеренную избыточность, целями которой являются обеспечение требуемых уровней надежности и отказобезопасности систем, увеличение их производительности или достижение иных полезных свойств за счет возможностей реконфигурирования ресурсов.

Совокупность операций, включающая как мониторинг состояния компонентов избыточного комплекса, так и парирование его неисправностей предложено называть управлением избыточностью. Понятие управления избыточностью шире распространенных в системотехнике понятий реконфигурирования и резервирования. Оно, в зависимости от физической природы и используемых эффектов, подразумевает управление аппаратной, программной, энергетической, временной, коммуникационной, информационной и другими видами избыточности. При этом должны выполняться несколько важных целевых установок, как показано на рис. 2.

Основные задачи при создании системы управления избыточностью видятся следующим образом:

- фундаментальные поисковые исследования по созданию научно-методического аппарата проектирования, разработки и оценки эффективности систем управления избыточностью;
- разработка способов управления избыточностью при решении целевых задач комплекса оборудования самолетов различного назначения;
- разработка рациональной организации данных и программ УИ для создания бортового СПО УИ;
- разработка системы сквозного автоматизированного проектирования КБО с управляемой избыточностью, соответствующих методик и программных средств;
- разработка рациональной архитектуры КБО с управляемой избыточностью, в первую очередь бортовой интегрированной вычислительной среды.



Рис. 2. Концепция управления избыточностью: методы, задачи и цели

К настоящему времени в зарождающейся научно-прикладной теории управления избыточностью сложились, разрабатываются или предполагаются по крайней мере четыре взаимосвязанных научно-технических блока:

- методы генерирования альтернативных конфигураций избыточного комплекса оборудования, охватывающие разнообразие подходов к целенаправленному созданию систем из определенного (заданного, предварительно отобранного) набора компонентов;

- средства управления избыточностью комплекса оборудования, к которым относятся всевозможные схемные и алгоритмические решения, реализующие в реальном времени процедуры выбора предпочтительной из всего множества заблаговременно отработанных (синтезированных, исследованных, верифицированных) конфигураций с учетом оговоренного множества критериев и показателей;
- средства мониторинга готовности компонентов в избыточных системах, ориентированные на обнаружение неправильного функционирования и диагностирование технического состояния этих компонентов, а также подтверждение наличия и (или) завершенности всевозможных процессов, поддерживающих или в обязательном порядке предшествующих их функционированию;
- инструменты совместной отработки процессов мониторинга и управления в избыточной системе, призванные сбалансировать затраты на создание и поддержание указанных процессов, а также разрешить неизбежно возникающие противоречия между ними. К сфере этих инструментов относится и оценка эффективности избыточных КБО.

Ожидается, что реализация концепции управляемой избыточности войдет в число важнейших составляющих создания высокоэффективных перспективных КБО.

Подход на основе супервизоров конфигураций

Принципиальным вопросом при построении системы управления избыточностью является рациональная организация логической структуры данных и программных процедур управления избыточностью. Основу развиваемого в последние годы подхода составляют супервизоры конфигураций (СК) по числу предусмотренных конфигураций КБО. Под конфигурацией понимается функционально приемлемая, выделенная для решения определенного набора задач взаимосвязанная (через целевые функции комплекса) совокупность аппаратных и/или программных компонентов КБО. В свою очередь, каждый СК представляет собой специальную информационно-логическую структуру, предназначенную для выполнения перечисленных ниже функций мониторинга, арбитража и реализации конфигураций.

Супервизорный подход к управлению резервом пояснен на рис. 3.

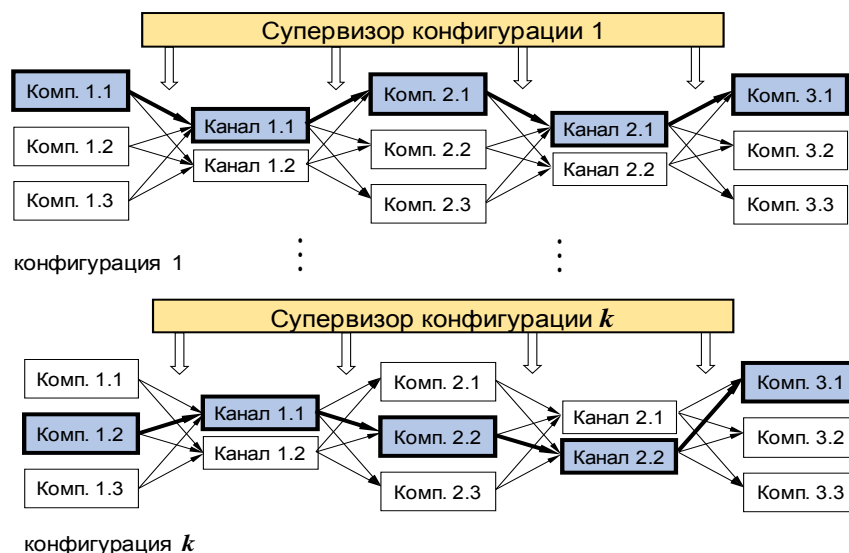


Рис. 3. Схема управления резервом на основе супервизоров конфигураций

К числу функций, возлагаемых на каждый СК, относятся:

- проведение мониторинга компонентов, охватываемых конфигурацией с формированием индекса готовности (ИГ) и показателя функциональной эффективности (ПФЭ) конфигурации;

- хранение информации о конфигурации: взаимных связях компонентов, распределении ресурсов и других данных, необходимых для ее реализации;
- участие в периодическом конкурсе – межсупервизорном арбитраже – на выявление наилучшей, предпочтительной в текущих условиях функционирования КБО, конфигурации, в результате которого победивший СК приобретает статус доминирующего (ДСК).

ДСК наделен, кроме того, функциями валидации, активизации и контроля функционирования конфигурации, соотношенной с ДСК, а также координации всех процедур управления избыточностью КБО.

Все супервизоры формируются на этапе проектирования согласно заранее рассчитанным непротиворечивым конфигурациям. Одинаковые копии супервизоров конфигураций размещаются в каждом предназначенном для данных целей вычислителе. Это позволяет распределить центр «принятия решения» и обеспечить высокие показатели отказоустойчивости системы реконфигурирования как таковой.

Перспективная система управления избыточностью

В соответствии с развиваемым подходом предложена структура системы управления избыточностью (СУИ) КБО, показанная на рис. 4. Система включает:

- множество разнородных компонентов периферийного оборудования КБО с встроенными средствами контроля (ВСК), связанных между собой коммуникационной системой (средствами коммутации и каналами передачи данных).
- центральную вычислительную систему, образованную множеством резервированных вычислителей, объединенных центральной вычислительной сетью,
- системное ПО, включающее специальное ПО управления избыточностью (на основе супервизорного подхода; одинаковый набор супервизоров по числу доступных заранее просчитанных конфигураций размещен в каждом вычислителе) и средства диспетчеризации бортовых функциональных приложений.

Информационная структура супервизора включает следующие основные компоненты: модуль мониторинга, таблицы конфигураций, формирователь режимов, модуль арбитража, управляющий модуль, а также вспомогательные процедуры и буферные файлы.

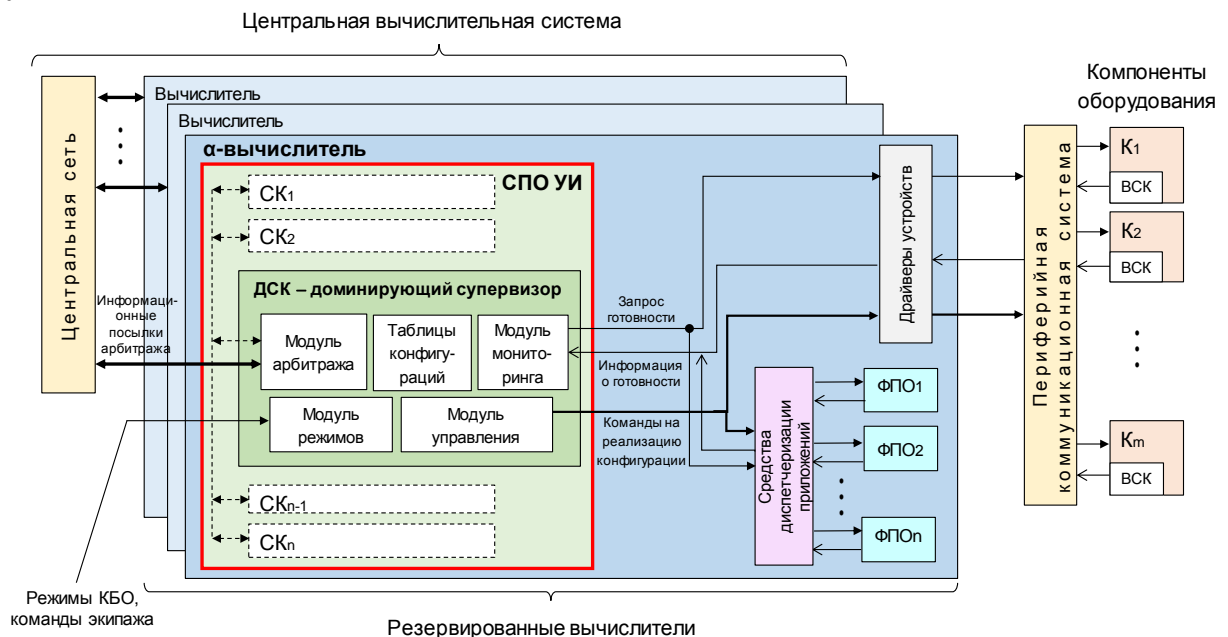


Рис. 4. Система управления избыточностью КБО

Информация о связях между компонентами КБО (для аппаратных ресурсов) и распределении функциональных приложений между вычислителями (для программных ресурсов) хранится в специальных таблицах конфигураций, формируемых на этапе разработки.

Система производит периодический мониторинг компонентов с формированием индексов готовности (ИГ) компонентов и конфигураций в целом, характеризующих их исправность, готовность к использованию, загрузку необходимых программ и т. д. Мониторинг предполагается многоуровневым, с поэтапным наращиванием по мере развития проекта. На нижнем базовом уровне он реализуется исключительно на основе имеющихся ВСК компонентов. По мере развития методологии мониторинга возможна интеграция с существующими или проектируемыми бортовыми системами автоматизированного контроля и технического обслуживания (БАСК, БСТО). Возможны дополнительные алгоритмические надстройки для обеспечения достоверности контроля на основе логических правил и алгоритмов прогнозирования состояния.

Для достижения целей функционального реконfigurирования вводятся показатели функциональной эффективности (ПФЭ), которые интегрально характеризуют уровень достижимых эксплуатационно-технических характеристик компонентов (например, точность, экономичность, результативность, статистика сбоев и др.). Формирователь режимов оценивает состояние этапов полета, режимов важных систем комплекса, уровень аварийности, команды экипажа и другие факторы, на основании которых производит коррекцию исходных ПФЭ, формируя в итоге текущий интегральный ПФЭ конфигурации. Таким образом обеспечиваются свойства адаптации СУИ к текущим условиям полета.

С целью определения наилучшей в текущих условиях конфигурации периодически или по факту изменения состояния реализуется процедура многоуровневого арбитража супервизоров. Процедура проводится поэтапно. Первый этап – выбор выделенной пары готовых (подтверждены работоспособность и завершенность подготовительных процессов) вычислителей. Второй этап – межсупервизорный арбитраж, на котором в вычислителях выделенной пары путем проведения парного арбитража выбирается доминирующая (предпочтительная) конфигурация с учетом как готовности, так и ПФЭ. Третий этап – межвычислительный арбитраж, обеспечивающий окончательное определение вычислителя, наделяемого полномочиями реализации (настройки, инициализации, контроля) доминирующей конфигурации – так называемого α -вычислителя.

Разработка методик обоснованного задания или алгоритмов вычисления ПФЭ представляет собой отдельную, специфическую и достаточно сложную проблему, в рамках данной статьи не рассматриваемую.

Работа СУИ организуется циклически или по факту отказа либо смены режима работы КБО.

В случае отказа какого-либо из компонентов конфигурации на очередном шаге работы СУИ выбирается следующая работоспособная (возможно, менее эффективная, но позволяющая выполнить целевую задачу) конфигурация, и так вплоть до последней работоспособной конфигурации. В случае смены состояния или режима работы КБО выбор конфигурации происходит, исходя из вновь сформированных показателей эффективности.

Управление конфигурированием всей совокупности избыточных разнородных ресурсов комплекса в каждый данный момент осуществляется централизованно, при этом имеет место децентрализация самой СУИ в смысле отсутствия единственного и поэтому уязвимого центра принятия решений.

Состояние работ по управлению избыточностью

В АО «НИИАО» в рамках выполнения технического проекта пилотного комплекса авионики необслуживаемого бортового оборудования (АНБО) для перспективных отечественных воздушных судов выполнены работы:

- изготовлены образцы базовых конструкций вычислительных и инфраструктурных модулей перспективных комплексов бортового оборудования;
- разработаны требования к специальному компоненту системного программного обеспечения вычислителей, ответственному за управление избыточностью;

- созданы технические средства стенда полунатурного моделирования АНБО и стендового прототипа системного программного обеспечения в части управления избыточностью.

Предварительные оценки эффективности подхода

В отличие от существующей стратегии эксплуатации до отказа, АНБО предполагает, что некритичные отказы резервированных компонентов смогут накапливаться до определенного уровня, а восстановление состояния происходит в период проведения периодических регламентных работ. При этом показатели надежности КБО должны удовлетворять заданным требованиям не через час полета, а в конце межрегламентного периода.

Предварительная оценка показывает ожидаемый прирост надежности КБО на 1–2 порядка по сравнению с традиционным покомпонентным резервированием. Расчетная интенсивность отказов СУИ при этом может достигать порядков $10^{-11} \div 10^{-13}$, что способно гарантировать высокие показатели отказобезопасности комплекса.

Результаты численного анализа, показанные на рис. 5, дают основание предполагать, что переход на необслуживаемое бортовое оборудование потенциально позволиткратно увеличить межрегламентный интервал при сохранении заданного уровня отказобезопасности, сократить потери в самолетовылетах почти в 3 раза, при этом снизив трудозатраты в 3,2, а общие затраты на эксплуатацию в 3,5 раза. Коэффициент оперативной готовности может быть увеличен почти на 15 %.

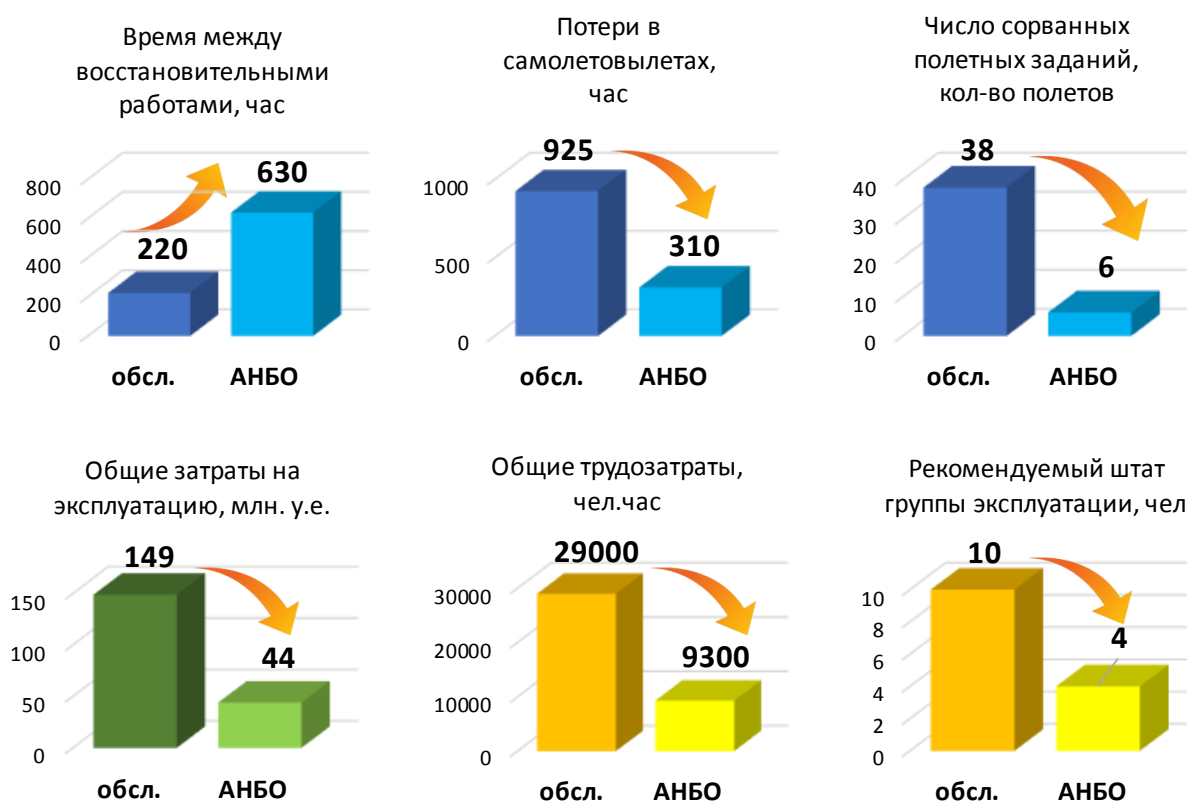


Рис. 5. Предварительная оценка эффективности стратегии АНБО с применением СУИ в структуре КБО

Таким образом, реализация СУИ предлагаемого типа позволит выполнить переход к новым стратегиям технического обслуживания, обеспечив предельно достижимые характеристики надёжности и безопасности, снизив при этом финансовые затраты авиаприборостроительных компаний и эксплуатантов. При этом, естественно, в новых проектах на основе принципов АНБО должны быть приняты во внимание и изменения в логистике восстановления отказавшего оборудования.