

В 1970-е годы в стране начались работы по созданию ЛА 4-го поколения. Прежде всего следует упомянуть работы по разработке самолётов и вертолётов в ОКБ П. О. Сухого, А. И. Микояна, Н. И. Камова и М. Л. Миля. Работы велись в кооперации с многими отечественными научными и научно-исследовательскими институтами, конструкторскими бюро и промышленными предприятиями страны.

В 1970-1980-е годы были созданы многофункциональные самолёты и вертолёты 4-го поколения Су-27, МиГ-29, МиГ-25, Ми-28, Ка-50. Как показала практика, эти ЛА обладали огромным модернизационным потенциалом и вплоть до настоящего времени являются конструкционными платформами при создании различных модификаций этих ЛА. На основе этих платформ отечественной авиационной промышленностью в последние годы создан ряд высокоэффективных боевых самолётов и вертолётов поколений 4+/4++, в частности — Су-27СМ, Су-34, Су-35, Су-30СМ/МКИ/МКМ/МКА/МКК, МиГ-35, МиГ-29СМТ/К/КР/КУБ/КУБР/КЕ, Ка-52/К, Ми-26Т2, Ми-28Н, которые стоят на вооружении российской армии, а также импортируются во многие страны.

Начиная с ЛА 4-го поколения их бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) стало объединяться в интегрированные функциональные комплексы бортового оборудования (КБО) различной сложности. Большой вклад в разработку КБО для самолётов и вертолётов поколений 4 и 4+/4++ внесло Раменское приборостроительное конструкторское бюро, которое исторически занимается проектированием бортового оборудования для самолётов и вертолётов различного класса и назначения. Многолетнюю научную, научно-техническую и методическую поддержку РПКБ в создании КБО оказывает ФАУ «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС) и Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ).

Интеграция различных навигационных, обзорно-прицельных, радиосвязных, управляющих, исполнительных систем и датчиков в единый КБО позволили радикально повысить надёжность, точность, степень автоматизации решения навигационных и боевых задач по сравнению с использованием отдельных систем. Интеграция осуществляется с помощью аналоговых и цифровых каналов информационного обмена и бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) – сначала одной-двух БЦВМ, затем целых бортовых цифровых вычислительных систем (БЦВС) – с соответствующим программным обеспечением (ПО).

Примерами КБО для ЛА 4-го поколения являются навигационные комплексы «Пеленг», КН-25, СН-29 и КН-10 соответственно для самолётов МиГ-25, МиГ-31, МиГ-29 и Су-27, созданные в РПКБ. С помощью этих КБО было автоматизировано решение многих пилотажно-навигационных задач, ранее решаемых экипажем «вручную». Однако, недостаточная мощность БЦВМ и преобладание аналоговых информационных связей не обеспечивали достаточно высокий уровень интеграции бортового оборудования. Многие датчики и системы имели собственные индикаторы и органы управления, в основном — электромеханические. Они постоянно занимали место на приборных панелях ЛА, независимо от того, нужны они на данном этапе полёта или нет.



Для примера, на фотографии слева показана кабина одного из самолётов поколения 4-. Как видно на фотографии, информационно-управляющее поле кабины (ИУП) чрезвычайно загромождено. Анализ, обобщение и обработку информации с разных индикаторов лётчик должен был делать, в значительной мере, сам. Это приводило к сильной перегрузке лётчика, особенно при выполнении боевых задач.

Наземная отработка взаимодействия систем КБО 4-го поколения, в том числе отладка и тестирование ПО БЦВМ, производилось на специальных лабораторных стендах, которые включали в себя реальные БЦВМ, индикаторы и пульта КБО, а также некоторые реальные информационно-измерительные системы и датчики (или их электромеханические имитаторы). К ним, при необходимости, подключали их контрольно-проверочную аппаратуру, а линии связи пропускали через специальные коммутационные устройства. Оработка ПО выполнялась, в основном, в статическом режиме, то есть на ограниченном количестве характерных наборов статичных входных сигналов.

Однако многие недостатки алгоритмов и программные ошибки проявляются только в динамическом режиме, когда вся входная информация, поступающая в БЦВМ непрерывно изменяется в реальном масштабе времени в соответствии с состоянием ЛА и окружающей навигационно-тактической среды в реальном полёте. Чего, очевидно, нельзя ожидать от информационно-измерительных систем и датчиков, установленных на лабораторном стеллаже.

Поэтому при создании КБО 4-го поколения отработка и тестирование ПО в динамическом режиме выносились на лётные испытания (ЛИ) ЛА. Однако, с точки зрения отработки КБО, ЛИ имеют существенные недостатки и сложности: дороговизна лётных экспериментов, их низкий темп, ограничения на выполнение рискованных и критических режимов, малая технологичность процедур анализа результатов, трудности локализации и исправления ошибок ПО в полевых условиях, удалённость полигона ЛИ от разработчиков КБО. В конечном счёте это приводит к увеличению стоимости и длительности работ по созданию КБО и невозможности полностью гарантировать отсутствие ошибок в его ПО.

По итогам разработки КБО для ЛА 4-го поколения и первым подходам, в конце 80-х годов, к разработке ЛА поколения 4+ в авиационной отрасли страны сложилось понимание, что процессы проектирования КБО, и в частности его ПО имеют все признаки кризисного состояния:

- проекты по разработке КБО выполняются со значительным превышением заданных сроков;
- КБО зачастую не полностью соответствует заданным требованиям;
- исходный код ПО КБО сложен для понимания и сопровождения.

Т. е. сложилась ситуация, которая имела большинство признаков известного «кризиса программного обеспечения» в наземной информатике 1970-х годов. Основной причиной этого кризиса было несоответствие технологий проектирования ПО возможностям и особенностям вычислительных систем, а также недостаточное владение разработчиками КБО методами проектирования надёжных и качественных систем и в частности их ПО.

В конце 90-х годов в стране сложились социально-экономические условия, позволившие вплотную приступить к созданию ЛА поколения 4+, а в последующем, примерно через десять лет, и к созданию ЛА поколения 4++. Причём на существенно более высоком техническом уровне чем в 80-х годах.

Увеличились объём и сложность задач, решаемых КБО. Появились новые информационно-измерительные и управляющие системы. Отечественной промышленностью были созданы новые мощные БЦВМ и гибкие, информационно ёмкие, многофункциональные жидкокристаллические индикаторы и пульта управления. КБО превратился в сложную информационно-вычислительную систему сетевого типа с цифровыми каналами информационного обмена по ГОСТ 18977-79 (аналог ARINC-429) и МКИО ГОСТ Р 52070-2003 (аналог MIL-STD-1553).

В центре КБО образовалось вычислительно-индикационное ядро из нескольких БЦВМ, ИЛС, МФИ и МФПУ. Более 90% информации, вырабатываемой КБО и остальным оборудованием ЛА, стала предъявляться лётчику в удобной графической форме на МФИ в объёме, необходимом в конкретной навигационно-тактической ситуации.

С приборной панели ЛА ушло множество электромеханических индикаторов и пультов, а оставшиеся перешли в категорию резервных.



Для примера, на фотографии слева показана кабина одного из самолётов поколения 4+.

В итоге намного вырос уровень автоматизации выполнения навигационных и боевых задач, нагрузка на лётчика существенно уменьшилась, а вероятность успешного выполнения боевых задач повысилась. С этого момента стало ясно, что самой сложной,

объёмной и продолжительной работой в процессе создания КБО является отладка алгоритмов и программ вычислительно-индикационного ядра КБО.

В 2010-х годах на самолётах поколения 4++ электромеханические приборы окончательно исчезли с приборной панели ЛА. Группа резервных при-



боров превратилась в единый резервный прибор с ЖК дисплеем. Для примера, на фотографии слева показана кабина одного из самолётов поколения 4++.

Существенно увеличилась вычислительная и графическая мощность вычислительно-индика-

ционного ядра КБО. Выросли возможности и роль обзорно-прицельных систем технического зрения (телевизионных, тепловизионных, лазерных, радиолокационных). Появились каналы информационного обмена с огромной пропускной способностью типа Fiber Channel. Практически 99% информации теперь предъявляется лётчику в удобной графической форме на больших МФИ с ЖК матрицей высокого разрешения, а также на широкоугольном ИЛС.

В ПО КБО активно внедряются технологии экспертных систем, поддержки сетевых боевых действий, искусственного интеллекта. С ростом автоматизации растёт эффективность и безопасность выполнения навигационных и боевых задач.

Такое улучшение свойств КБО ЛА поколений 4+/4++ достигнуто, прежде всего, за счет многократного роста объёма и сложности ПО БЦВС и информационного трафика в каналах информационного обмена.

Отработка ПО с помощью технологий, применявшихся на ранних этапах развития КБО в «кризисных» условиях, потребовало бы невероятно огромных трудовых усилий, временных и финансовых затрат.

Негативные последствия «кризиса программного обеспечения» в наземной информатике 70-х годов были в существенной мере преодолены разработкой ряда мер методологического характера и развитием теории системной разработки надёжного и качественного ПО.

Аналогичные меры, системно-методологического характера, во многом благодаря усилиям и инициативам ГосНИИАС, были предприняты в авиационной отрасли страны, в том числе и в РПКБ. Так на уровне всей авиационной отрасли одной из ключевых технологий при создании и отработке авиационных систем было признано полунатурное моделирование.

Поэтому в Раменском приборостроительном КБ было принято принципиальное решение, что бóльшая часть работ по отработке, тестированию и сопровождению КБО ЛА должна осуществляться на стендах полунатурного моделирования (СПНМ).

В соответствии с этим решением РПКБ, в научно-техническом сотрудничестве с ГосНИИАС и МГТУ, стало активно создавать СПНМ и внедрять их в технологические процессы создания и сопровождению КБО всех ЛА. В результате в РПКБ за 25 лет образовался обширный парк СПНМ, развёрнутых в отдельном корпусе на площади более 1000 кв. м.

СПНМ позволяют смоделировать на земле динамическую навигационно-тактическую информационную среду, а также работу отсутствующих на стенде реальных элементов КБО, таким образом, чтобы процессы в БЦВМ ядра КБО, на МФИ, на ИЛС, в каналах информационного обмена, работа с основными органами управления на стенде протекали как на настоящем ЛА. Разработчики получили возможность в комфортных лабораторных условиях сколь угодно часто совершать виртуальные полёты для поиска ошибок в ПО КБО и мгновенно корректировать бортовые программы для устранения ошибок или улучшения алгоритмов. А также убедительно показывать представителям заказчика степень готовности КБО к лётным испытаниям.

В натурном виде в СПНМ включается оборудование КБО, функционирование которого физически не связано с движением ЛА. В виртуальном виде в СПНМ включаются элементы КБО, состояние и данные от которых определяются состоянием движущегося ЛА и внешней навигационно-тактической среды. К ним относятся основные измерительные системы (инерциальные, радиотехнические, аэрометрические, обзорно-прицельные и т. п.).

Информационной основой корректной работы всех элементов виртуального оборудования, коррелированной между собой и с реальным оборудованием в натурной части стенда, является математическая модель движения ЛА (в автоматическом и/или ручном режиме управления) и математическая модель внешней навигационно-тактической среды.

Неотъемлемой частью СПНМ также являются сервисные инструменты для мониторинга вычислительных процессов в БЦВМ ядра КБО и трафика в каналах информационного взаимодействия по ходу полунатурного эксперимента, для оперативной корректировки и загрузки программ в БЦВМ, для обработки результатов полунатурных экспериментов и данных с ЛИ.

СПНМ, созданные в РПКБ и ГосНИИАС, на практике доказали своё решающее значение для повышения эффективности процессов разработки и модернизации КБО. Но их потенциал ещё не исчерпан.

В начале 2000-х годов в РПКБ были выполнены работы по созданию СПНМ с расширенным применением технологий виртуальной реальности. В первую очередь — с внедрением средств визуализации закабинного пространства и имитации видео от систем технического зрения.

Технологии СПНМ нашли применение и на более ранних этапах проектирования и разработки КБО. С их помощью был создан стенд виртуального прототипирования (СВП) — для быстрого прототипирования различных вариантов компоновки МФИ, графики мнемокадров, методик выполнения перспективных полётных процедур и т. п.

Удобство тестирования ПО в динамическом режиме привело к созданию т. н. «мобильных» версий СПНМ, которые реализуются в ПО одной из БЦВМ КБО. Мобильные СПНМ обеспечили возможности динамического тестирования ПО КБО на борту реального ЛА при наземных работах в процессе летных испытаний.

Представленные результаты по созданию СПНМ доложены авторами на многих научно-технических конференциях, опубликованы в 26 научных статьях, получены 10 патентов РФ и 23 свидетельства на ПО. Их реализация осуществлена в РПКБ и ГосНИИАС.

КБО большинства отечественных ЛА поколений 4+/4++, эксплуатируемых в России и за рубежом, созданы в РПКБ. В сумме РПКБ разработало десятки (около 50, включая различные модификации) КБО и поставило многие сотни комплектов КБО. Все они, на соответствующих этапах, прошли отработку и тестирование на СПНМ. Эти СПНМ поддерживаются в рабочем состоянии для сопровождения КБО в процессе эксплуатации соответствующих ЛА.

**Основные научные достижения**, полученные в работе:

1. Представлена концепция определения оптимальной структуры СПНМ КБО с использованием принципов построения интеллектуальных систем.
2. Разработана структура СПНМ КБО, способная изменять свой рабочий контур в зависимости от проверяемых задач.

3. Получили дальнейшее развитие теория и методы решения задач разработки качественных и надёжных КБО с использованием технологии полунатурного моделирования и эти задачи решены в практическом плане.

4. Определены пути и методы дальнейшего развития технологии полунатурного моделирования при проектировании КБО ЛА.

**Практическая ценность данной работы** состоит в том, что её основные результаты и положения в полном объёме внедрены в технологические процессы создания и сопровождения КБО самолётов и вертолётов Су–27СМ, Су–34, Су–35, Су–30/СМ/МКИ/МКМ/МКА/МКК, МиГ–35, МиГ–29/СМТ/К/КУБ/КР/КУБР/КЕ, Ка–52/К, Ми–26, Ми–28Н и др.

С высокой экономической эффективностью была успешно решена сложная научно-техническая проблема, возникшая при создании боевых ЛА поколений 4+/4++. За счёт уменьшения трудоёмкости создания КБО в РПКБ, а также за счёт уменьшения объёма летных испытаний достигнут экономический эффект, который по экспертно-расчётным оценкам составляет более 11.6 миллиардов рублей в ценах 2023 года.

Всеми специалистами отрасли признано, что внедрение СПНМ в технологические процессы разработки и сопровождения КБО привело к сокращению сроков разработки, улучшению качества КБО, уменьшению объёма ЛИ ЛА, повышению надёжности и устойчивости решения навигационных и боевых задач ЛА, что в результате способствовало укреплению оборонной мощи России.

**Работа имела важное государственное значение для технического перевооружения ВКС России и военно-технического сотрудничества с зарубежными странами. Созданное семейство СПНМ обеспечивает успешную разработку, сопровождение и оперативное совершенствование КБО ЛА поколений 4+/4++, что подтверждается их эффективной работой в операциях ВКС России в ходе СВО.**