

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ АВИАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Клочков В. В.^{1а,б}, Топоров Н. Б.^{2б,в}, Егошин С. Ф.^{3б}

^а ФГБУН Институт проблем управления

им. В.А. Трапезникова РАН, Москва,

^б ФГБУ НИЦ «Институт им. Н.Е. Жуковского»,
Жуковский,

^в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва)

Повышение эффективности управления научно-технологическим развитием авиастроения на данном этапе возможно за счет перехода к рассмотрению крупномасштабных систем с большим количеством «степеней свободы». Впервые предложен и развит методологический подход к прогнозированию и стратегическому планированию научно-технологического развития авиастроения, основанный на анализе и синтезе не отдельных образцов авиационной техники или авиационных комплексов, а интегрированных систем. Эти системы направлены на решение целевых задач высокого уровня и включают в себя парки различных воздушных судов, а также инфраструктурные и управляющие подсистемы, включая неавиационные подсистемы целевого заказчика. Методология исследования базируется на теории систем, методах системного анализа и синтеза, математическом моделировании. Предложенный подход позволяет выявлять потенциальные области применения перспективной авиационной техники в сфере транспорта и различных отраслях национальной экономики, а также оценивать потенциальные масштабы применения авиации. Результаты моделирования и оптимизации интегрированных авиационных систем должны стать основой планирования приоритетных научных исследований и разработок в авиастроении, в том числе при формировании государственных программ Российской Федерации, стратегий развития научных и промышленных организаций авиастроения.

Ключевые слова: интегрированная авиационная система, моделирование, оптимизация, проектирование летательных аппаратов, системный анализ, научно-технологическое развитие авиастроения.

¹ Владислав Валерьевич Клочков, д.э.н. (klochkovvv@nrczh.ru).

² Николай Борисович Топоров, д.т.н., профессор (toporov@nrczh.ru).

³ Сергей Федорович Егошин, специалист (sergey4791@yandex.ru).

1. Введение

Развитие математических методов и их практическая реализация с применением компьютерной техники с учетом ее совершенствования позволили разработчикам авиационной техники начиная со второй половины XX века постепенно повышать уровень сложности моделирования [17, 18] и оптимизации как летательных аппаратов (ЛА) в отдельности, так и среды их применения. Системные исследования стали значимой областью прикладной авиационной науки [3, 4, 10, 14]. Не очерчивая строгие временные рамки, можно условно выделить следующие этапы развития этой области.

1. Оптимизация ЛА (здесь и далее – одно- или многокритериальная).

Математическая постановка задачи сводится к отысканию наилучшего сочетания проектных параметров, при которых реализуется оптимум целевой функции (если критерий один) или множество эффективных вариантов (множество Парето для набора частных критериев эффективности, если таковых критериев более одного).

2. Оптимизация обликов авиационных комплексов (АК).

Так как АК – функционально связанная система, включающая летательный аппарат, бортовое оборудование и целевое оснащение, экипаж, средства обеспечения и обслуживания специального назначения и предназначенная для выполнения некоторого множества задач [6, 12], то процесс оптимизации параметров облика АК от предыдущего случая отличается тем, что рассматриваемый объект моделирования – это не обособленный ЛА, а ЛА в сочетании с оборудованием/снаряжением, которое может создаваться независимо от ЛА. Так, например, типичным образцом подобного АК может служить комплекс ПВО, состоящий из истребителя-перехватчика как носителя ракет класса «воздух – воздух», собственно указанных ракет, комплекса радиосвязного оборудования для целеуказания с земли и единой системы управления и наведения. Оптимизация облика АК (т.е. решение задачи синтеза оптимального облика АК) позволяет

повысить ожидаемую эффективность применения разработанного АК.

3. Оптимизация обликов авиационных систем (АС).

В данном случае под АС следует понимать совокупность АК (возможно, разнотипных по назначению) и обеспечивающей их жизнедеятельность авиационной инфраструктуры. Совместное использование АК и инфраструктуры позволяет решить определенный набор задач [11, 16]. Таким образом, в АС, помимо собственно АК, также входят аэропорты и посадочные площадки, топливозаправочные комплексы и склады ГСМ, объекты системы организации воздушного движения (ОрВД), авиаремонтные заводы (АРЗ), склады запасных частей, сменных узлов и агрегатов, и прочие производственные, сервисно-логистические и управляющие подсистемы.

Однако в настоящее время, с одной стороны, назрела необходимость, а с другой стороны – появились возможности рассмотрения и оптимального проектирования систем еще более высокого уровня [13, 15, 19, 20], включающих в себя как собственно АС, так и «ответную часть», объекты целевой области применения авиации. В данной работе обоснована актуальность постановки и решения таких задач, предложена формализация их постановки.

2. Проблемы моделирования и оптимизации авиационных систем различного уровня

Исследование АС является комплексным подходом, позволяющим найти более предпочтительные управляющие и проектные решения, в отличие от оптимизации АК и, тем более, ЛА. «Платой» за возможность получения этого решения становятся: проблема рационального выбора критериальной базы решения задачи, значительное усложнение самого процесса поиска решения задачи (вследствие увеличения ее размерности) и повышение рисков принятия некорректного решения.

Так, например, ошибки при решении задачи прогнозирования спроса на перевозки пассажиров в масштабах мировой авиатранспортной системы, АТС (которая также относится

Управление техническими системами и технологическими процессами

к задаче оптимизации АС) привели компанию Airbus к решению создать самолет сверхбольшой пассажироместимости А380. Однако дальнейшее производство и эксплуатация А380 показали, что, несмотря на общий рост объемов авиационных пассажироперевозок, самолет пользуется ограниченным спросом и его производство – убыточно.

В графической форме иерархию описанных уровней моделирования и оптимизации систем в области авиации и авиастроения можно представить в следующем виде:

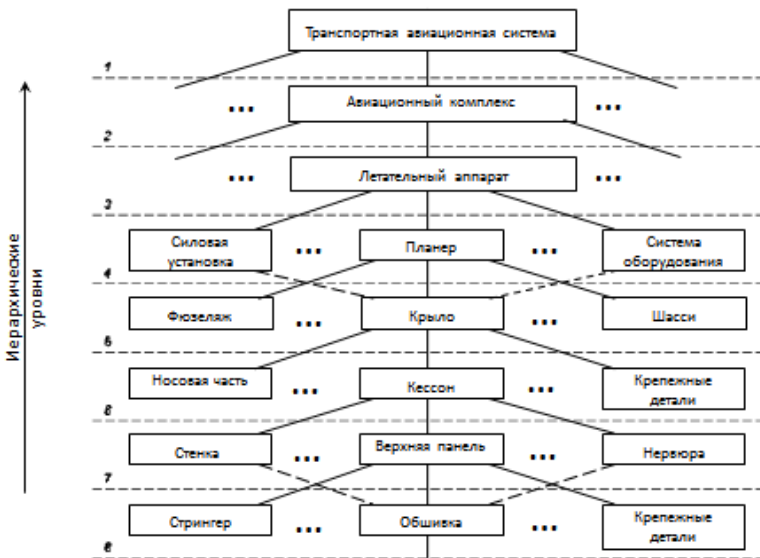


Рис. 1. Иерархия структуры летательного аппарата как части большой технической системы [5]

Уровни 1–3 можно отнести к этапу внешнего проектирования АК (ЛА), и каждому из этих уровней соответствует один из трех вышеуказанных типов оптимизации. При этом проектирование АС, соответствующее верхнему, первому уровню, позволяет не только сформировать облик ЛА, но и определить роль

и место АК (ЛА) в общем парке, потребное их количество, требования к аэродромам базирования, составу экипажей и наземного персонала и т.д.

Уровни же 4–8 соответствуют задачам, решаемым либо авиационной наукой в кооперации с разработчиками ЛА или АК, либо непосредственно в конструкторских бюро (формирование технического предложения, аванпроекта и эскизного проекта, технической документации).

Для уровней 1–3 математическую формулировку задачи оптимизации можно представить в следующем виде:

$$(1) \begin{cases} \text{extr } S(X), \\ F(X) \geq A, \\ G(X) \leq B; \end{cases}$$

где S – векторная целевая функция (критерий оптимальности); $X = \{x_1, \dots, x_m\}$ – вектор проектных параметров оптимизируемой системы; $F(X)$ – векторная функция требуемых уровней (объемов) выполнения P целевых задач A ($A = \{a_1, \dots, a_n\}$); $G(X)$ – векторная функция Q ограничений B ($B = \{b_1, \dots, b_q\}$).

Для каждой из технических систем, соответствующих уровням 1–3, входящие в постановку задачи (1) величины и функции будут различаться. При этом для системы более высокого уровня параметрами (управляющими переменными) могут являться как характеристики (свойства), так и параметры системы более низкого уровня.

В стремлении найти глобальный оптимум АТС целесообразна такая постановка задачи оптимизации, в которой вектором проектных параметров X этой системы верхнего уровня будут являться выходные параметры систем более низкого уровня.

Но тогда при каждом понижении уровня (т.е. детализации, разукрупнении) системы, параметры которой будут использоваться в качестве вектора X системы 1-го уровня, будет происходить значительное усложнение постановки задачи 1-го уровня (и соответственно усложняться отыскание решения).

То есть «сквозная» оптимизация при проектировании подобной многоуровневой системы «в один проход» как в направлении «снизу вверх», так и «сверху вниз» на практике обречена

Управление техническими системами и технологическими процессами

на неудачу. Это вызвано не только катастрофическим ростом размерности задачи. При попытках ее декомпозиции по уровням иерархии, если в системе проектирование происходит по принципу «снизу вверх» (решение, по какому-либо критерию оптимальное для системы нижнего уровня, становится входными, проектными параметрами для системы вышерасположенного уровня), то найденный оптимум системы верхнего уровня далеко не всегда будет соответствовать глобальному оптимуму системы. Если же проектирование вести «сверху вниз», оптимальное решение задачи верхнего уровня может оказаться нереализуемым, недопустимым для систем нижнего уровня.

Приведенное противоречие можно проиллюстрировать примером задачи оптимизации АТС местных авиалиний в отдаленных, труднодоступных и малонаселенных районах (ОТДМР) Российской Федерации. Общее количество аэродромов и посадочных площадок, необходимых для обслуживания ОТДМР, составляет несколько сотен. В силу социально-экономических факторов местные авиаперевозки в России не являются экономически прибыльными, а потому требуют дотирования со стороны государства. Следовательно, критерием оптимальности S на верхнем уровне иерархии решения задачи целесообразно считать затраты государства на поддержание некоторого уровня транспортного обслуживания ОТДМР (например, поддержание заданного уровня авиационной мобильности населения этих регионов при заданной частоте рейсов или даже при заданном гарантированной времени в пути «от двери до двери»). Тогда если в качестве исходных данных принимаются характеристики существующих типов ВС «малой авиации», то задача (1), решаемая в постановке верхнего 1-го уровня, может быть сведена к задаче целочисленного программирования. В этой задаче вектор X будет состоять из управляющих булевых переменных, включающих или исключающих задействование каждого из аэродромов, а также целочисленных переменных, определяющих количество рейсов для каждой возможной авиалинии и состав потребного парка ВС.

Современные математические методы позволяют найти точное решение приведенной целочисленной задачи. Вместе

с тем полученное решение не обязательно будет находиться в окрестности глобального оптимума затрат системы, в первую очередь ввиду ограниченности альтернативных вариантов ВС (только существующие типы), среди которых может и не быть оптимальных. Более того, на практике полученное на основе существующего типажа ВС решение может оказаться недопустимым либо потому что такая АТС обеспечит недопустимо низкое качество авиатранспортного обслуживания, очень редкие рейсы, либо потому что потребные затраты государства на поддержание заданного транспортного стандарта выйдут за рамки реальных возможностей бюджета.

Чтобы найти более предпочтительное решение, в постановке задачи верхнего, 1-го уровня целесообразно заменить набор априорно заданных типов ВС на математическую модель произвольного самолета местных воздушных линий (так называемый «резиновый самолет»), варьируемые параметры которой дополнительно войдут в вектор X . Данный шаг приведет к тому, что задача из целочисленной превратится в непрерывную, причем существенно нелинейную. Но поскольку возросшие возможности современной компьютерной техники позволяют найти приближенное решение для многих подобных задач применительно к большим техническим системам, это открывает возможности для дальнейшего усложнения исходной задачи 1-го уровня.

При этом рост сложности возможен не только за счет расположенных ниже уровней иерархии (т.е. с добавлением в расчетную модель переменных, служащих для описания моделей 4-го, 5-го и т.д. уровней), но и за счет расширения состава рассматриваемой надсистемы. Предпосылки и возможности для этого шага излагаются ниже.

В качестве основного подхода в этой ситуации может быть предложена циклическая двунаправленная процедура поиска рационального решения, объединяющая каждую пару уровней последовательно как при движении вверх, так и вниз. Причем начало такой последовательности опирается на наиболее высокий в иерархии уровень, который и определяет как критериальную базу с дальнейшей декомпозицией критериев для более

низких уровней решения задачи, так и последовательность ее решения [11].

3. Предпосылки перехода к рассмотрению интегрированных авиационных систем

В XX веке авиация достаточно быстро сформировалась именно как сложная организационно-техническая система. Ее возникновение и развитие было обусловлено не только возможностями научно-технического прогресса, но и интересами и нуждами граждан, социальных групп, предприятий, государств. Авиация стала не самоцелью, как на этапе ее становления, а средством (причем, как правило, лишь одним из многих альтернативных) решения различных проблем общества и государства, вплоть до уровня национальной и мировой экономики [2].

Однако авиация зачастую не является единственным способом решения этих проблем, а чаще одним из возможных инструментов. И далеко не обязательно какие-то целевые задачи в народном хозяйстве будут решаться именно привычными авиационными средствами, и наоборот, авиация может найти новые области применения. Поэтому при решении задачи оптимального построения АС необходимо учитывать все компоненты, включая не только обеспечивающие функционирование авиации (авиационную инфраструктуру), но и решающие целевые задачи в единой надсистеме более высокого уровня (т.е. уже неавиационную, «целевую» инфраструктуру).

Таким образом, решающая роль в повышении эффективности авиационной деятельности переходит уже от оптимизации АС к оптимизации всей среды (сферы деятельности или отрасли экономики), в которой применяется авиация.

В качестве примера может быть приведена санитарная авиация как «длинная рука» системы здравоохранения [7]. Наибольший эффект от ее развития будет получен отнюдь не при локальной оптимизации парка ВС, аэродромов и посадочных площадок для фиксированной сети обслуживаемых медицинских учреждений. Он будет получен именно при глобальной оптимизации пространственной организации здравоохранения,

включая расположение, масштаб и специализацию медицинских учреждений с учетом возможностей, предоставляемых санитарной авиацией.

При этом и система медицинских учреждений, и санитарная авиация должны быть многоуровневыми, эшелонированными, в зависимости от сложности соответствующих видов медицинской помощи и интенсивности соответствующих «заявок». Так, первую медицинскую помощь целесообразно оказывать на базе фельдшерско-акушерских пунктов, и в несложных случаях, когда требуется консультация профильных специалистов, – прибегая к технологиям телемедицины. В более сложных случаях, когда необходимо личное посещение профильного специалиста или оказание высокотехнологичной медицинской помощи, доступ к соответствующим медицинским учреждениям возможен при организации санитарных перевозок (в том числе авиационных) между населёнными пунктами и медицинскими учреждениями. Для оказания неотложной медицинской помощи и эвакуации пострадавших в тяжёлом и критическом состоянии целесообразно использовать именно санитарную авиацию. ЛА санитарной авиации также могут быть разнотипными. Часть из них должна обладать возможностью использования неподготовленных взлётно-посадочных площадок, другие санитарные ЛА должны выполнять скоростные дальние перевозки с использованием аэродромов. Но важнее, что вся система в целом – «сеть медучреждений плюс санитарная авиация» – должна обеспечивать необходимую оперативность медицинской помощи.

Таким образом, из понимания роли авиации как части соответствующей отрасли народного хозяйства и следует необходимость разработки новых подходов к прогнозированию и планированию ее развития.

Наиболее системный подход, позволяющий получать глобально оптимальные решения, состоит в рассмотрении (анализе путем математического и компьютерного моделирования и последующем оптимальном синтезе) интегрированных авиационных систем (ИАС), включающих в себя:

- многотипный парк ВС различного назначения;

Управление техническими системами и технологическими процессами

– объекты авиационной инфраструктуры;
– неавиационные объекты отраслей народного хозяйства (промышленные и сельскохозяйственные предприятия, медицинские учреждения, государственные территориальные службы и т.д.), которые и выполняют основную целевую функцию и для обеспечения деятельности которых и предназначена рассматриваемая специализированная ИАС.

Первые два компонента из трех, как было сказано выше, составляют АС, добавление третьего превращает ее в ИАС:

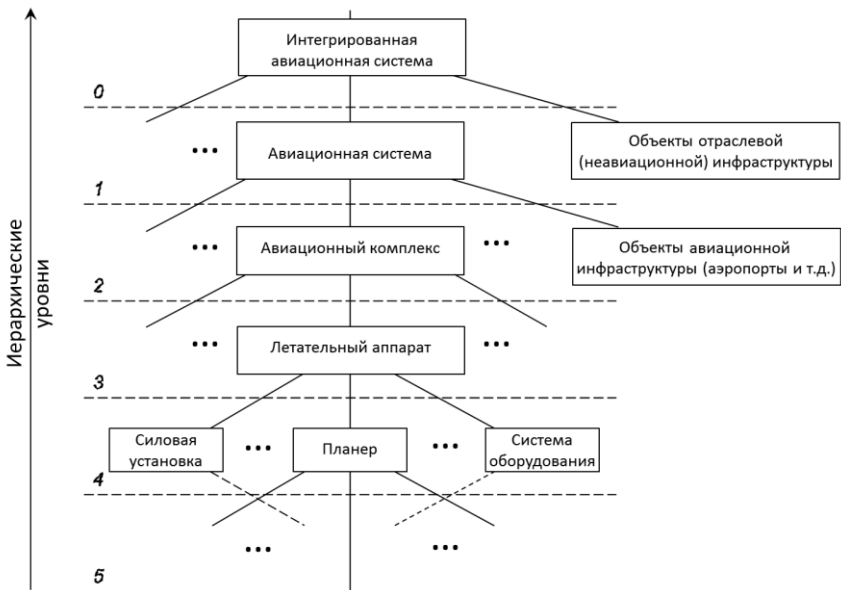


Рис. 2. Интегрированная авиационная система

Отсюда можно дать следующее определение: ИАС – это совокупность различных авиационных комплексов (воздушных судов), наземной и воздушной управляющих, обеспечивающих и целевых инфраструктур, совместно и координированно решающая определенный спектр целевых задач в условиях изменяющегося внешнего окружения и при соответствующих ограничениях.

В состав ИАС может входить несколько АС. Однако ключевым фактором, отличающим АС от ИАС, является включение в систему объектов инфраструктуры, непосредственно решающей целевые задачи. Условное обозначение уровня «0» на рис. 2 следует трактовать не только как продолжение нумерации рисунка 1 (во избежание путаницы). Тем самым мы также косвенно подчеркиваем тот факт, что еще более вышестоящий уровень анализа и оптимизации на данном этапе развития авиационной науки сложно сформулировать.

Различные ИАС могут развиваться почти изолированно друг от друга и рассматриваться в отдельности. В то же время различные ИАС могут и объединяться на уровне отдельных подсистем. Их общими структурными элементами могут быть, например, аэродромы, объекты ОрВД или предприятия авиационно-промышленного комплекса (его предприятия работают в интересах многих ИАС).

4. Обоснование целесообразности рассмотрения интегрированных авиационных систем

Плодотворность моделирования ИАС (и решения соответствующей оптимизационной задачи самого верхнего уровня) может быть проиллюстрирована следующим образом.

Пусть целевой критерий оптимизации C_{Σ} – это стоимость создания и применения ИАС в рассматриваемый период планирования. Суммарные затраты C_{Σ} складываются из затрат $C_{\text{АВИА}}$ на АС, являющуюся компонентой системы, и непосредственно отраслевых затрат $C_{\text{ОТР}}$, приходящихся на остальные, неавиационные компоненты целевой области применения – отрасли, предприятия и т.п. В примере санитарной авиации это сеть учреждений. Если инфраструктура отрасли рассматривается как фиксированная (не подлежащая оптимизации), можно, разве что, найти оптимум затрат на АС (при заданном объеме авиационных работ и услуг, который обозначается величиной X и отображается по оси абсцисс), равный $C_{\text{АВИА}}^0$, и соответствующие ему отраслевые затраты $C_{\text{ОТР}}^0$, см. рис. 3.

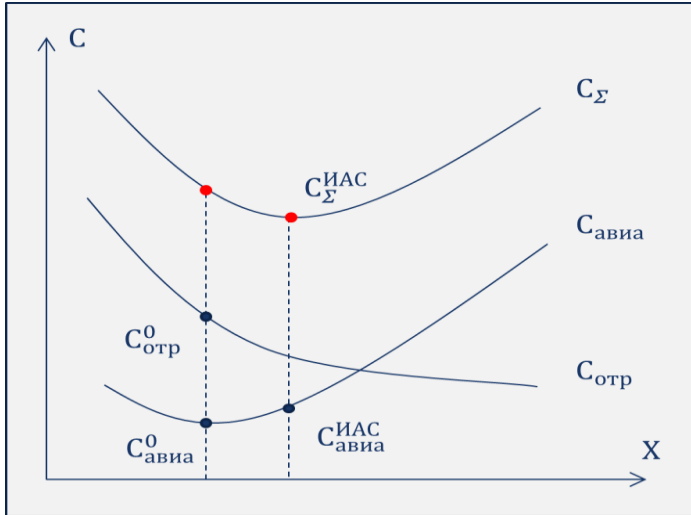


Рис. 3. Условие существования ИАС

Однако если оптимизация затрат производится в рамках единой постановки задачи оптимизации ИАС (т.е. в которой АС не рассматривается отдельно, а процесс оптимизации затрагивает все, в том числе неавиационные компоненты системы), то это, в зависимости от условий, может обеспечить более или менее значительное снижение суммарных затрат:

$$(2) \quad C_{\Sigma}^{\text{ИАС}} < C_{\text{АВИА}}^0 + C_{\text{ОТР}}^0.$$

Приведенный график показывает наглядно, что интересы заказчика не всегда сводятся лишь к тому, чтобы получить определенные авиационные работы или услуги с наименьшими затратами. Его целью является наиболее эффективное удовлетворение своих конечных потребностей, теми или иными средствами. Поэтому вполне возможно, что, например, при снижении цены и/или повышении качества авиационных работ и услуг оптимальный спрос на них возрастет настолько, что общие затраты заказчиков именно на авиационные работы и услуги увеличатся:

$$(3) \quad C_{\text{АВИА}}^{\text{ИАС}} > C_{\text{АВИА}}^0.$$

И, тем не менее, это будет эффективно для конечного заказчика, для области целевого применения авиации.

Таким образом, проблема поиска рационального объема применения авиации (и, как следствие, – оценка спроса на продукцию авиастроения) в первую очередь относится к научной постановке задачи формирования рационального облика ИАС в целом. При этом рассмотрение ИАС обладает еще одним несомненным положительным качеством: применение данного подхода позволяет объективно формализовать как существующие области применения авиации (включая возможности их качественного изменения под влиянием технологического развития и самой авиации, и других областей техники), так и появление принципиально новых областей применения авиации.

Интегрированные авиационные системы могут быть выделены во многих отраслях (видах экономической деятельности) и сферах жизнедеятельности общества. Кроме рассмотренного примера санитарной авиации, формирование ИАС актуально для следующих случаев:

- пассажирские, грузовые и почтовые перевозки в отдаленных, труднодоступных и малонаселенных регионах (ОТДМР);
- агропромышленный комплекс (в том числе авиахимработы, точное земледелие);
- лесное хозяйство (в том числе авиалесоохрана, пожаротушение и т.п.);
- топливно-энергетический комплекс (ТЭК);
- внутригородской аэромобильный транспорт;
- мониторинг и инспектирование границ и территорий;
- дистанционное зондирование Земли, картографирование, разведка полезных ископаемых и биоресурсов;
- службы экстренного реагирования (обеспечение правопорядка);
- и др.

Во всех данных областях применения авиации актуален поиск рационального баланса между:

- с одной стороны, специфическими возможностями и особенностями применения авиационной техники;

Управление техническими системами и технологическими процессами

– с другой стороны – технологическими потребностями различных отраслей и сфер жизнедеятельности, обусловленными их конечными целевыми задачами.

Собственно, это и наблюдается на протяжении всей истории авиации: изначально затраты на авиационную деятельность вообще отсутствовали, однако авиация, развиваясь, постепенно занимала все более значимое место в жизни общества. Именно такой взгляд на место авиации как средство решения некоторых конечных, фундаментальных проблем потребителей позволяет искать новые (перспективные) сферы применения авиации, корректно оценивать потенциальный спрос на авиационные работы и услуги, на продукцию авиастроения и смежных отраслей.

Что касается практического воплощения концепции ИАС, то она не исчерпывается реорганизацией на научной основе соответствующих областей жизнедеятельности. ИАС могут существовать как в форме сбалансированного комплекса разноплановых субъектов экономики (например, авиатранспортные предприятия и обслуживаемое население отдаленных населенных пунктов), так и в форме обособленного предприятия, консолидирующего всех участников отдельного вида деятельности (например, агропромышленное предприятие с авиационным подразделением). И если пространственная организация этих субъектов (а также, вероятно, сама технология решения целевых задач) будет меняться с учетом возможностей авиации, транспортных и других факторов, то именно их развитие в форме ИАС может оказать наибольшее благотворное влияние на социально-экономическое процветание общества в целом.

5. Математическая постановка задачи оптимального проектирования ИАС

Состав ИАС, структура ее подсистем, характеристики их элементов должны быть целесообразными и эффективными с точки зрения целей применения и развития ИАС. Для достижения наилучших результатов, как уже было сказано, все перечисленные параметры ИАС следует оптимизировать совместно.

Рассмотрим более подробно математическую постановку задачи (1) применительно к задаче оптимизации ИАС, ее взаимосвязь и отличие от задачи оптимизации АС.

Пусть рассматривается K различных АС, $1 \leq k \leq K$, и для каждой k -й АС может быть сформулирована следующая задача оптимального проектирования:

$$(4) \quad \begin{cases} \min S_k(X_k), \\ F_k(X_k) = A_k, \\ G_k(X_k) \leq B_k; \end{cases}$$

где $S_k(X_k)$ – векторная целевая функция затрат (по этой причине минимизируемая), рассчитываемая для k -й АС независимо от прочих АС; $X_k = \{m_{1k}, \dots, m_{lk}, n_{1k}, \dots, n_{jk}, \bar{x}_{1k}, \dots, \bar{x}_{lk}, \bar{y}_{1k}, \dots, \bar{y}_{jk}\}$ – вектор проектных параметров, в состав которого входят управляющие переменные m_{1k}, \dots, m_{lk} как количества ВС l типов, $1 \leq l \leq I$, каждый из которых описывается вектором характеристик \bar{x}_{lk} , и n_{1k}, \dots, n_{jk} как количества J типов авиационной инфраструктуры, $1 \leq j \leq J$, каждый из которых описывается вектором характеристик \bar{y}_{jk} ; $F_k(X_k)$ – векторная функция требуемых объемов работы A_k в k -й АС; $G_k(X_k)$ – векторная функция требований (качественных ограничений) B_k , предъявляемых к k -й АС.

Тогда, в отличие от АС, постановка соответствующей оптимизационной задачи для «профильной» (отраслевой) ИАС будет иметь схожий вид, но со следующими изменениями:

$$(5) \quad \begin{cases} \min S_0(X_0), \\ F_0(X_0) = A_0, \\ G_0(X_0) \leq B_0; \end{cases}$$

где $S_0(X_0)$ – векторная целевая функция затрат ИАС, в общем виде не совпадающая с любой из S_k ; $X_0 = \{m_1, \dots, m_l, n_1, \dots, n_j, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_l, \bar{y}_1, \dots, \bar{y}_j, p_1, \dots, p_Q, \bar{z}_1, \dots, \bar{z}_Q\}$ – является вектором X_k тех же проектных параметров $m_{1k}, \dots, m_{lk}, \bar{x}_{lk}, n_{1k}, \dots, n_{jk}$ и \bar{y}_{jk} , но расширенным за счет дополнительных переменных p_1, \dots, p_Q как количеств Q типов рассматриваемых объектов целевой отраслевой (неавиационной) инфраструктуры, $1 \leq q \leq Q$,

Управление техническими системами и технологическими процессами

каждый из которых также описывается вектором характеристик \vec{z}_q ; $F_0(X_0)$ – векторная функция, определяющая требуемые объемы работы A_0 в рассматриваемой ИАС, не совпадающая с любой из A_k ; $G_0(X_0)$ – векторная функция ограничений B_0 , предъявляемых к рассматриваемой ИАС, не совпадающая с любой из B_k .

Здесь необходимо подчеркнуть, что, в отличие от X_0 , векторы A_0 и B_0 в рассматриваемой ИАС будут существенно другими по сравнению с соответствующими им A_k и B_k , в том числе не будут являться их расширенной суперпозицией.

Именно в этом и заключается особенность постановки задачи рационального формирования структуры и параметров ИАС. Для вектора A_0 объем работы будет отличаться от объема авиационных работ, выполняемого непосредственно АС. Если вернуться к примеру медицинского обслуживания, то соответствующая ИАС оказывает услуги здравоохранения, в то время как АС санитарной авиации – только услуги медицинской транспортировки. Аналогичным образом в векторе B_0 могут задаваться совершенно иные требования, чем в B_k : скажем, для ИАС предприятий трубопроводного транспорта целесообразно ставить условие прокачки определенных объемов нефти по заданному участку трубопроводной сети с минимальными потерями от утечек и аварий, а не условие выполнения патрульных облетов не меньше заданного объема, как для традиционной патрульной АС [8].

Вследствие этого векторы F_0 и G_0 , а также целевая функция S_0 будут иметь вид, значительно отличающийся от F_k , G_k и S_k (причем невозможно априорно выделить регулярные соотношения между ними).

6. Некоторые особенности формирования ИАС

Исследование ИАС относится к задачам системного анализа. В соответствии с определениями этого раздела математической науки, ИАС следует классифицировать как очень сложную систему, т.е. систему, отличающуюся большой разветвленно-

стью связей и своеобразием отношений между элементами [1, 9]. Соответственно, проблематика, присущая ИАС, будет, при неизбежной специфичности, схожа с общей проблематикой системного анализа, как-то: формализация описания объектов проектирования, формирование различных проектных решений, методов их инженерного анализа и методов принятия решений, и т.д. Не останавливаясь подробно на данных аспектах, рассмотрим более детально только некоторые из них.

6.1. ЦЕЛЕПОЛАГАНИЕ РАЗВИТИЯ ИАС

Как уже было отмечено выше, удовлетворение потребностей конечного заказчика авиационных работ или услуг как основного стейкхолдера является прямым стимулом для появления и развития новой авиационной техники. В то же время, помимо заказчика, существует еще несколько других групп стейкхолдеров, например:

- поставщики авиационных услуг или работ, если они выступают как независимые от заказчика субъекты;
- предприятия гражданской авиации: авиакомпании, аэропорты и другие предприятия, обеспечивающие ее функционирование;
- разработчики и изготовители авиационной техники, опелепродажных услуг и т.п., т.е. предприятия авиационной промышленности;
- государство (если оно не является заказчиком или поставщиком услуг) как выразитель интересов общества, в том числе третьих лиц, испытывающих на себе влияние авиационной деятельности: в сфере экологии, безопасности и т.п.;
- собственно указанные третьи лица.

В приведенном списке коммерческие предприятия преследуют, как правило, сугубо коммерческие цели. Внутри предприятий как сложных организмов также есть разные группы стейкхолдеров с различными интересами – владельцы (акционеры), наемные работники, менеджмент.

Что касается третьих лиц, то на них распространяются как положительные (улучшение транспортной доступности территорий), так и отрицательные внешние эффекты авиационной

Управление техническими системами и технологическими процессами

деятельности (техногенные опасности, экологический ущерб и т.д.).

Государство (в идеале) балансирует интересы всех групп стейкхолдеров. И даже в тех секторах гражданской авиации, которые могут успешно развиваться на рыночной основе, оно, как регулятор, по крайней мере ограничивает рамки допустимого ущерба от авиационной деятельности, обеспечивает социальную защиту наемных работников всех отраслей и т.п.

Как результат, интересы всех перечисленных групп стейкхолдеров определяют целеполагание развития соответствующей ИАС. Поскольку этих групп несколько и их интересы не совпадают, целеполагание должно быть результатом компромисса между разнонаправленными интересами. Только такой системный взгляд на цели развития ИАС позволяет обеспечить корректное целеполагание, в том числе в части научно-технологического развития авиастроения.

6.2. ЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ИАС

Настоящая проблема вытекает из предыдущей относительно целеполагания развития ИАС и касается не только теоретической части вопроса, но и реализации ИАС на практике.

При формировании новой ИАС, строго говоря, неочевидно, какими характеристиками должны обладать ее элементы. Если на рынках магистральных пассажирских самолетов за десятилетия развития уже сложилась довольно стабильная структура, то в новых областях применения авиации, а также при значительном изменении традиционных областей, такой определенности еще нет. И на начальных этапах технологического развития определить оптимальные (и даже допустимые) характеристики элементов ИАС и связей между ними можно только централизованно [2]. С экономической точки зрения, появление независимых производителей инновационных продуктов/услуг (которые изначально рассматривались как соответствующие элементы ИАС) становится целесообразным, только когда ожидаемый объем реализации этих продуктов/услуг превысит определенный порог.

Данное обстоятельство может значительно повысить риск ошибки при создании ИАС и потребовать более совершенных методов моделирования. В частности, может потребоваться разработка не статической, а динамической математической модели ИАС. В ней заказчику авиационных работ или услуг, взяв на себя роль системного интегратора, на первом этапе придется самостоятельно обеспечивать себя необходимыми компонентами и услугами (недостающими элементами системы), и лишь по мере созревания рынка передавать эти функции на аутсорсинг.

С практической же точки зрения, из приведенных рассуждений вытекает необходимость изначально предлагать клиентам комплексные решения в виде интегрированных систем, а не искать потребителей отдельно взятых ЛА. Например, производитель аэротакси для внедрения своих ЛА будет вынужден принять непосредственное участие в создании (по крайней мере организовать создание по заказу городских властей или частного инвестора) городской авиатранспортной системы со всей необходимой управляющей, сервисной и логистической инфраструктурой, нормативной и правовой базой. Практическая реализация ИАС будет означать создание в городе или агломерации системы «под ключ», представляющей собой комплексное решение для пользователей транспортных услуг. Лишь потом, когда подобные системы будут сформированы, а ЛА станут их стандартными элементами с обоснованными и проверенными на практике требованиями к значениям их характеристик, появятся отдельные рынки данных классов ЛА, и возникнут условия для развития конкурентных рынков этих изделий.

7. Применение методологии ИАС на примере ТЭК

В качестве примера применения предлагаемого методического аппарата может быть рассмотрена ИАС ТЭК (обслуживание магистралей нефте-/газопровода).

В состав такой ИАС входят малые патрульные беспилотные летательные аппараты (БПЛА), специализированная наземная инфраструктура базирования БПЛА, дежурные бригады оперативного реагирования, каждая из которых оснащена одним спе-

*Управление техническими системами
и технологическими процессами*

циализированным 3÷4-местным вертолетом (винтокрылым летательным аппаратом, ВКЛА).

Вдоль магистрали длиной $L_{\text{маг}}$ патрулируют малые БПЛА, челночно перемещаясь от одного пункта базирования до другого и обратно. Пункты базирования удалены друг от друга на расстояние $L_{\text{БПЛА}}$, и условно считается, что это расстояние меньше дальности полета БПЛА (т.е. ограничение на дальность полета БПЛА не ставилось). Общее количество БПЛА и пунктов базирования – $N_{\text{БПЛА}}$. БПЛА характеризуются крейсерской скоростью $V_{\text{БПЛА}}$ и стоимостью летного часа $c_{\text{л.ч.}}$. Годовая стоимость содержания одного пункта базирования – $c_{\text{пл.}}$.

При обнаружении утечки нефти БПЛА в автоматическом режиме вызывает ремонтную бригаду. Пункты базирования ремонтных бригад также расположены вдоль магистрали, и расстояние между ними определяется радиусом действия ВКЛА.

Оператор нефтегазовой магистрали испытывает потребность не в патрулировании как таковом, а в минимизации суммарных затрат на патрулирование и потерь от утечек нефти. Эффект от внедрения более эффективных ВС в сфере патрулирования магистралей будет наибольшим, если типаж, численность и налет парка летательных аппаратов (ЛА), а также облик потребной инфраструктуры будут способствовать скорейшему обнаружению аварийных ситуаций и минимизации ущерба от них. Функция годовых затрат S оператора магистрали в этом случае будет иметь вид:

$$(6) \quad S = C_{\text{ВКЛА}} + C_{\text{БПЛА}} + C_{\text{пл}} + C_{\text{уб}} + C_{\text{ш}},$$

где $C_{\text{ВКЛА}}$ – стоимость годовых затрат на содержание ремонтных бригад, включая эксплуатацию ВКЛА; $C_{\text{БПЛА}}$ – стоимость годового налета БПЛА; $C_{\text{пл}}$ – годовая стоимость содержания пунктов базирования БПЛА; $C_{\text{уб}}$ – стоимость вытекшей нефти как потерянного продукта; $C_{\text{ш}}$ – экологический штраф.

Вводится предположение, что повреждения трубопровода могут происходить равновероятно в любом месте. В этом случае затраты $C_{\text{ВКЛА}}$ зависят только от длины трубопровода и количества аварийных ситуаций и могут быть рассчитаны априорно независимо от других статей затрат. Иначе говоря, для заданно-

го трубопровода затраты $C_{\text{ВКЛА}}$ входят в выражение для S как константа, и по этой причине $C_{\text{ВКЛА}}$ далее подробно не рассматриваются.

Пусть T_0 – регулярность (дни), с которой БПЛА совершают облет магистрали. Тогда

$$(7) \quad C_{\text{БПЛА}} = C_{\text{л.ч.}} \times \frac{L_{\text{маг}}}{V_{\text{БПЛА}}} \times \frac{365}{T_0}; \quad C_{\text{ш}} = N_{\text{БПЛА}} \times c_{\text{ш}};$$

$$C_{\text{уб}} = c_{\text{н}} \times m_{\text{н}}^t \times t_0; \quad C_{\text{уб}} = c_{\text{ш}} \times (m_{\text{н}}^t \times t_0)^2.$$

Здесь $c_{\text{н}}$ – стоимость единицы нефти; $m_{\text{н}}^t$ – количество нефти, в среднем вытекающей из места повреждения за единицу времени; t_0 – время, прошедшее с момента возникновения утечки до ее устранения; $c_{\text{ш}}$ – коэффициент экологического штрафа за единицу вытекшей нефти. При этом общий штраф $C_{\text{уб}}$ начисляется пропорционально квадрату количества вытекшей нефти: считается, что нефть растекается по окружающей территории как по площади, тем самым размер ущерба окружающей среде нарастает весьма быстрыми темпами:

$$(8) \quad m_{\text{н}}^t = w \times \frac{L_{\text{маг}}}{1000} \times \rho,$$

где w – вероятность повреждения трубопровода в год из расчета на 1000 км его длины; ρ – осредненный поток вытекающей нефти.

Варьируемыми параметрами ИАС являются регулярность облета T_0 и количество БПЛА $N_{\text{БПЛА}}$. Отсюда t_0 вычисляется как среднее время обнаружения в зависимости от того, в каком случае обнаружение утечки произойдет раньше:

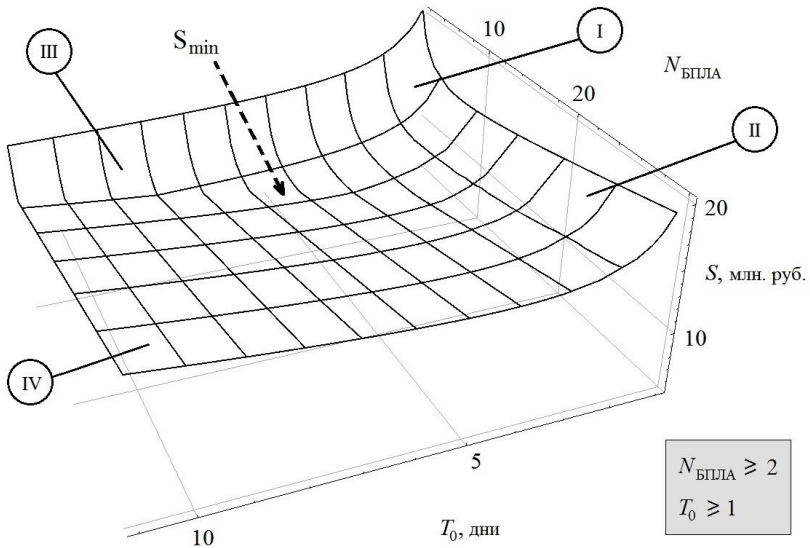
$$(9) \quad t_0 = t_p + \frac{1}{2} \times \begin{cases} T_0, & \frac{L_{\text{маг}}}{N_{\text{БПЛА}} \times V_{\text{БПЛА}}} \leq T_0, \\ \frac{L_{\text{маг}}}{N_{\text{БПЛА}} \times V_{\text{БПЛА}}}, & \frac{L_{\text{маг}}}{N_{\text{БПЛА}} \times V_{\text{БПЛА}}} > T_0. \end{cases}$$

Здесь t_p – средняя поправка, включающая время прибытия ремонтной бригады и остановки утечки, невозможность обнаружения утечки в ночное время и т.д.

*Управление техническими системами
и технологическими процессами*

В качестве примера при расчете затрат использовались следующие значения параметров: $L_{\text{маг}} = 2400$ км, $V_{\text{БПЛА}} = 60$ км/ч, $c_{\text{л.ч.}} = 500$ руб./л.ч., $C_{\text{пл}} = 240$ тыс. руб./год, $c_{\text{н}} = 25$ тыс. руб./м³, $w = 0,08$, $\rho = 0,0044$ м³/с (или 380 м³/день, нефиксируемый приборами расход нефти), $c_{\text{ш}} = 2500$ (задан как 10% от стоимости вытекшей нефти за день), $t_{\text{р}} = 12$ часов.

Общий вид поверхности S имеет вид (рис. 4, целочисленные величины трактуются как непрерывные).



*Рис. 4. Затраты ИАС в зависимости от регулярности облета
магистралей и количества патрульных БПЛА
(не включая затраты на ВКЛА)*

Приведенные случаи соответствуют:

- I – «малое количество БПЛА, высокая регулярность облета»;
- II – «большое количество БПЛА, высокая регулярность облета»;
- III – «малое количество БПЛА, низкая регулярность облета»;
- IV – «большое количество БПЛА, низкая регулярность облета».

Во всех приведенных случаях рост затрат связан или с ростом расходов на авиационную составляющую ИАС, или с ро-

стом убытков вследствие потерь транспортируемой нефти. Минимум затрат $S_{min} \sim 9,2$ млн руб./год – это область поверхности, которая соответствует параметрам $T_0 = 6 \div 7$ дней, $N_{БПЛА} = 6$.

Таким образом, для заданного примера выбор оптимальных параметров ИАС может привести к экономии на уровне 20÷50%: ~ 10 млн руб./год вместо 12÷15 млн руб./год при неоптимальном выборе (области I÷IV на рис. 4).

8. Выводы

На современном этапе развития авиации при планировании или прогнозировании ее развития становятся устаревшими расчетные методы, в которых оперируют изолированными воздушными судами, авиационными комплексами или даже авиационными системами, выполняющими заданные объемы авиационных работ и услуг. Наиболее комплексным подходом является рассмотрение интегрированных авиационных систем (ИАС), в рамках которых возможна совместная оптимизация состава и численности парка авиационной техники, необходимой авиационной инфраструктуры и неавиационных объектов целевого заказчика авиационных работ или услуг.

В основе подхода ИАС лежит тезис о решающем значении целеполагания применения авиации с точки зрения конечных заказчиков. И поскольку любая ИАС формируется исходя из их потребностей, уровень ИАС в иерархии уровней оптимизации ЛА располагается выше, чем уровень просто авиационных систем, что, с одной стороны, повышает сложность решаемой задачи, но, с другой стороны, позволяет найти более рациональные в глобальном плане решения.

При этом обсуждаемые проблемы значимы не только для авиации. Сама идея ИАС заключается в совместной оптимизации авиационной и неавиационной составляющих отрасли «клиента». Развитие интегрированных авиационных систем как рациональное распределение задач между ЛА различных типов и рациональное размещение необходимой авиационной и неавиационной инфраструктуры может оказать положительное влияние на пространственную организацию общества, экономи-

Управление техническими системами и технологическими процессами

ки, государства. Современные средства математического моделирования позволяют найти необходимые решения в этой сфере быстрее, чем методом проб и ошибок, который при этом оказывается еще и неприемлемо дорогостоящим и рискованным.

Развитие методологии ИАС позволит адекватно оценивать истинные потребности заказчиков авиационных работ и услуг, возможности их удовлетворения посредством авиации, прогнозировать потенциальные объемы применения авиации, в том числе находить новые перспективные рынки реализации как авиационных работ и услуг, так и продукции авиастроения. Необходимость централизованно формировать и исследовать интегрированные авиационные системы становится очевидной именно при переходе к новым технологическим укладам – как в авиации, так и в областях ее целевого применения.

Литература

1. АНТОНОВ А.В. *Системный анализ* – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.
2. ДУТОВ А.В., КЛОЧКОВ В.В. *Стратегическое управление развитием авиационных технологий: проблемы и современные решения* // Экономический анализ: теория и практика. – 2013. – №48(351). – С. 2–15.
3. ЖЕЛТОВ С.Ю., КИСЛИЦЫН Ю.Д., САМОЙЛОВ Д.В., ХОХЛОВ С.В. *Современные подходы в моделировании авиационных систем* // Сборник тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции. – М.: ГосНИИ АС. – 2020. – С. 5.
4. ЖЕРЕБИН А.М., КРОПОВА В.В., МАЛАФЕЕВ И.В. *Концептуальные основы и модельно-методическое обеспечение процесса управления созданием научно-технического задела с позиции формирования рационального состава парка самолетов заданного функционального назначения* // Сборник тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции. – М.: ГосНИИ АС. – 2020. – С. 12-13.

5. ЕГЕР С.М., ЛИСЕЙЦЕВ Н.К., САМОЙЛОВИЧ О.С. *Основы автоматизированного проектирования самолетов.* – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
6. ИСАЕВ А.С., СТАВРОВСКИЙ Б.И. *Основы эффективного анализа и синтеза авиационных комплексов: Учебное пособие.* – М.: МАИ, 1983. – 78 с.
7. КЛОЧКОВ В.В., ЕГОШИН С.Ф. *Задачи развития санитарной авиации и совершенствования пространственной организации здравоохранения в России // Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник.* – 2020. – Вып. 15, ч. 2. – С. 628–637.
8. КЛОЧКОВ В.В., НИКИТОВА А.К. *Методы прогнозирования спроса на беспилотные летательные аппараты и работы по воздушному патрулированию // Проблемы прогнозирования.* – 2007. – №6. – С. 144–151.
9. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами.* – М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
10. СЛИВИЦКИЙ А.Б. *Комплексный анализ целеполагания в системе стратегического планирования в области авиационной деятельности // Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник / Под ред. В.И. Герасимова.* – Институт научной информации по общественным наукам РАН, отдел научного сотрудничества, 2019. – С. 475–482.
11. ТОПОРОВ Н.Б. *Применение моделирования для внешнего проектирования сложных организационно-технических авиационных систем // Труды Международной научной конференции СРТ2019, 13-17 мая 2019 г., Царь-Град, Московская область, Россия.* – 2019. – С. 50–56.
12. ТОПОРОВ Б.П., ГОРЛОВ В.М. *Проблемы формирования рационального облика и типажа сложных технических систем, функционирующих в условиях конфликта и неопределённостей // Труды IV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, Россия.* – 2002.

13. ADJEKUM D.K., TOUS M.F. *Assessing the relationship between organizational management factors and a resilient safety culture in a collegiate aviation program with Safety Management Systems (SMS)* // Safety science. – 2020. – Vol. 131. – DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104909.
14. DRAY L.M., KRAMMER P., DOYME KH., WANG B., AL ZAYAT K., O'SULLIVAN A., SCHAFER A.W. *AIM2015: Validation and initial results from an open-source aviation systems model* // Transport policy. – 2019. – Vol. 79. – P. 93–102.
15. EMMANOUIL K. *Reliability in the era of electrification in aviation: A system approach* // Microelectronics reliability. – 2020. – Vol. 114.
16. FEI X., BIN CH., SIMING ZH. *A methodology of requirements validation for aviation system development.* – August 2020. – P. 4484–4489. – DOI: 10.1109/ccdc49329.2020.9164301.
17. FUJIMOTO R.M. *Parallel and distributed simulation systems.* – Wiley, 2000. – 320 p.
18. PRITCHETT D. *Base: an acid alternative* // ACM Queue. – N.Y.: ACM, 2008. – Vol.6, No.3. – P. 48–55.
19. SAVKIN A.V., HUANG H. *Asymptotically optimal deployment of drones for surveillance and monitoring* // Sensors. – 2019. – No. 19. – 11 p.
20. WITTMER A., BIEGER T. *Fundamentals and structure of aviation systems* // Aviation systems. Management of the integrated aviation value chain. – Hardcover, 2011. – Vol. XVII. – P. 5–38.

INTEGRATED AVIATION SYSTEMS

Vladislav Klochkov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science (klochkovvv@nrczh.ru).

Nikolay Toporov, National Research Center “Zhukovskiy Institute”, Zhukovskiy, Doctor of Science, professor (toporov@nrczh.ru).

Sergey Yegoshin, National Research Center “Zhukovskiy Institute”, Zhukovskiy, (sergey4791@yandex.ru).

Abstract: Improving the efficiency of management of aircraft industry scientific and technological development at this stage is possible through the transition to the consideration of large-scale systems with a large number of "degrees of freedom".

For the first time methodological approach to forecasting and strategic planning of scientific and technological development of aircraft industry, based on analysis and synthesis of integrated systems, rather than individual aircraft or aviation systems, has been proposed and developed. These systems are designed to address high-level objectives and include fleets of various aircraft, as well as infrastructure and control subsystems, including non-aviation subsystems of the target customer. The research methodology is based on the systems theory, system analysis and synthesis methods, and mathematical modeling. The proposed approach allows us to reveal the potential fields of application of prospective aviation in transport and various sectors of the national economy, as well as estimate the potential scale of aviation. The results of modeling and optimization of integrated aviation systems should form the basis for planning of priority research and development in aircraft industry, including the formation of state programs of the Russian Federation, the development strategy of scientific and industrial organizations of aircraft industry.

Keywords: integrated aircraft system, modelling, optimization, aircraft design, systems analysis, scientific and technological development of aircraft industry.

УДК 051.7 + 629.1

ББК 39.52

DOI: 10.25728/ubs.2021.90.5

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Р.М. Нижегородцевым.*

Поступила в редакцию 11.01.2021.

Опубликована 31.03.2021.