

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НАРОДНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ

УДК 629.735
10.17213/2075-2067-2018-6-3-9

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ И ИХ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2018 г. В. В. Клочков

*Национальный исследовательский центр
«Институт им. Н. Е. Жуковского», г. Жуковский
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва*

Показано, что требования к перспективным изделиям авиационной техники, особенно беспилотным, предназначенным для новых сегментов рынков авиационных работ и услуг, весьма разнообразны, и нередко нельзя выделить относительно массовые классы изделий по определенным показателям или их совокупностям.

Предполагается, что в этих случаях перспективен модульный принцип конструирования изделий авиационной техники.

Выявлены элементы и системы летательных аппаратов, где применим модульный принцип, а также те элементы, которые придется проектировать и изготавливать индивидуально, для чего определены предпочтительные технологии.

Показано, что производство и ремонт таких изделий авиационной техники могут стать распределенными, приближенными к местам их базирования и эксплуатации.

Ключевые слова: авиационная техника; типаж; эффективность; унификация; специализация; кастомизация; модульность; распределенное производство.

It is shown that the requirements for promising aircraft, especially unmanned, designed for new segments of the aviation works and services markets, are very diverse, and often it is impossible to allocate relatively mass classes of products with respect to certain indicators or their sets.

It is assumed that in these cases, the modular design principle of aircraft is promising.

We identified elements and systems of aircraft, where the modular principle is applicable, as well as those elements that will have to be designed and manufactured individually, for which the preferred technologies are determined.

It is shown that the production and repair of such aircraft products can become distributed, close to their locations and operation.

Key words: aircraft; model range; efficiency; unification; specialization; customization; modularity; distributed production.

Проблема формирования оптимального типажа авиационной техники для новых и развивающихся рынков авиационных работ и услуг

Анализ требований к перспективным продуктам гражданского авиастроения показал, что они весьма многообразны. Разнообразие областей применения авиации для выполнения различных авиационных работ и оказания услуг, в т. ч. новых (пока не существующих) видов, таково, что для выполнения соответствующих функций потребуются воздушные суда:

— с очень широким диапазоном грузоподъемности, начиная с нескольких кг или даже долей кг, и до нескольких т;

— как с вертикальными взлетом и посадкой и режимом висения, так и с обычными (самолетными) взлетом и посадкой, иногда — амфибийные, с лыжным шасси и т. д.

Особенно разнообразны требования в части легких и сверхлегких ВС, в основном беспилотных, предназначенных для решения широкого круга задач *применения авиации в народном хозяйстве* (ПАНХ)¹, в т. ч. новых и перспективных. Как правило, требуемые максимальные и крейсерские скорости полета невелики — в пределах 300 км/ч (нередко и меньше — до 100–200 км/ч).

В силу новизны многих сегментов соответствующих рынков авиационной техники и самих областей применения ВС требования к соответствующим платформам пока характеризуются значительной неопределенностью, поэтому отчасти (но не полностью) широкие диапазоны требуемых значений показателей обусловлены неполнотой знаний о будущем применении перспективных изделий и, следовательно, об их оптимальных параметрах. Но и после начала выпуска и эксплуатации соответствующих изделий, по мере накопления опыта их использования и оптимизации требований вполне может оказаться, что сами эти требования все равно остаются весьма разнообразными, т. е. конкретные значения, например, необходимой грузоподъемности могут варьировать на десятки процентов или даже в несколько раз. Так, ВС сельскохозяйственного назна-

чения для применения в рамках концепции точного земледелия могут иметь существенно различную необходимую грузоподъемность в зависимости от вида возделываемых культур, особенностей климата и почв и т. п. Иногда уже определенно можно сказать, что требуемая грузоподъемность ВС может варьировать в широких пределах. Например, если рассматриваются ВС для грузоперевозок [2, 3], в т. ч. почтовых, для снабжения жилых, социальных и производственных объектов в труднодоступных и малонаселенных местностях, рациональные значения грузоподъемности могут варьировать на порядок и более, в зависимости от грузопотока и ограничений на время доставки.

С одной стороны, сама по себе задача формирования рационального типажа перспективной авиационной техники решается десятки лет, в т. ч. формализованными методами [1]. С другой стороны, в обсуждаемом специфичном сегменте рынка она имеет важные особенности, которые определяют и специфические решения и в конце концов неочевидные выводы относительно приоритетных направлений технологического развития авиастроения.

Теоретически можно создавать «под» каждую регулярно выполняемую задачу или даже конкретную миссию ВС, оптимизированные под эти задачу или миссию по размерности, грузоподъемности, максимальной и крейсерской скоростям полета и другим характеристикам.

С одной стороны, это позволит избежать излишних затрат, связанных с избыточной размерностью ВС (а также избыточным уровнем других характеристик), по большинству статей эксплуатационных расходов, включая:

— затраты на ГСМ или иные энергоносители, поскольку они возрастают с ростом уровня требований к характеристикам ВС — полезной нагрузке и взлетной массе, скорости полета и др.;

— затраты на пользование инфраструктурой — аэропортовые сборы и сборы за УВД (которые, в свою очередь, также привязаны к максимальной взлетной массе, т. е. возрастают с ростом требуемой полез-

¹ Традиционно этим термином обозначали многообразие авиационных работ, в т. ч. авиационно-химические, лесопожарные, аэрофотосъемку и картографию, и т. п.

ной нагрузки и, возможно, некоторых других характеристик).

То есть лучшее соответствие характеристик ВС (размерности и грузоподъемности, а также уровня прочих характеристик — летно-технических, взлетно-посадочных и т.п., поскольку их улучшение тоже влечет за собой повышение вышеперечисленных статей затрат) и требуемого их уровня для решения данной задачи или выполнения данной миссии, как правило, позволяет избежать избыточных операционных издержек (за исключением, возможно, одной их составляющей, которая будет подробно рассмотрена ниже).

С другой стороны, серийность выпуска каждой такой специализированной модели ВС может оказаться относительно небольшой или даже единичной, поэтому себестоимость таких «кастомизированных» ВС может оказаться неприемлемо высокой по следующим основным причинам:

1) средние постоянные затраты высоки, поскольку постоянные издержки на исследование, разработки и технологическую подготовку производства (а также накладные, общезаводские и т.п. постоянные затраты) распределяются на малое количество однотипных изделий;

2) средние переменные затраты также могут быть высоки, даже несмотря на меньшую материалоемкость производства, поскольку издержки на оплату труда будут высокими вследствие высокой удельной трудоемкости штучного или малосерийного производства. Снижению удельной трудоемкости производства авиационной техники, как правило, способствует *эффект обучения* [8]. Благодаря накоплению опыта выпуска однородной продукции, удельная трудоемкость ее производства снижается (разумеется, до некоторого предела). Однако этот эффект играет положительную роль именно при относительно больших масштабах выпуска (причем, производство должно быть относительно ритмичным, чтобы накопленный опыт не терялся вследствие обратного эффекта — *забывания*).

Вызванный малой серийностью рост себестоимости производства и, как следствие, цены ВС, в свою очередь повысит стоимость владения ВС (амортизацию или лизинговый платеж). Она наряду с текущими операционными издержками и составляет суммарные полные эксплуатационные расходы. При «кастомизации» или, наоборот, унификации ВС для решения различных задач (выполнения различных миссий) еще одна значимая составляющая операционных затрат — стоимость ТОиР — может меняться неоднозначным образом. С одной стороны, с ростом уровня требований к ВС, его сложности, может возрастать трудоемкость и, следовательно, стоимость ТОиР, т.е. при избыточности уровня требований к ВС придется нести и избыточные затраты на их ТОиР. В то же время стоимость ТОиР существенно зависит от численности парка в эксплуатации, от серийности выпуска изделий, и потому даже при меньшей размерности и массе ВС, меньшем уровне его сложности, ТОиР малочисленных, малосерийных изделий может оказаться существенно дороже, чем для более сложных, крупных, материалоемких, но и более массовых. То же самое касается и затрат на материально-техническое (логистическое) обеспечение, МТО эксплуатации парка ВС, т.е. на снабжение запасными частями, их хранения на складах и т.п. Подробнее количественные модели соответствующих зависимостей см. в работах [4, 5]².

С учетом описанного положительного эффекта масштаба парка, наоборот, ТОиР и МТО сильно «кастомизированных» изделий может оказаться дороже, чем унифицированных, но массовых, впрочем, возможно и противоположное. Обе последние составляющие эксплуатационных затрат — стоимость владения ВС и стоимость ТОиР и МТО — ведут себя по мере унификации или, наоборот, «кастомизации» ВС неоднозначно.

Итак, при унификации ВС, предназначенных для выполнения различных задач и миссий, возрастают, как правило, затраты

2 Строго говоря, следует рассчитывать не изолированную стоимость ТОиР, а именно совокупные затраты на поддержание бесперебойной эксплуатации парка, включая как прямые затраты на ТОиР (материальные и трудовые), так и стоимость содержания распределенной инфраструктуры ремонтных мощностей, складов запчастей и сменных изделий, узлов и агрегатов, затраты на логистическое обеспечение системы послепродажного обслуживания (ППО), а также в общем случае потери, вызванные неизбежными при любых предпринимаемых мерах простоями ВС.

на ГСМ или иные энергоносители, а также разнообразные сборки. Наоборот, при «кастомизации» ВС под решение конкретных задач, как правило, возрастает стоимость владения ВС и, возможно, затраты на поддержание бесперебойной эксплуатации парка, поэтому разработчики и производители авиационной техники ищут оптимальный баланс между серийностью производства и удовлетворением требований конкретной задачи (миссии), между унификацией и специализацией («кастомизацией») ВС. Решается задача формирования оптимального типажа, модельного ряда ВС. В работе [6] для аналогичной задачи применительно к патрульным БЛА, предназначенным для несения различной полезной нагрузки (для мониторинга различных явлений, с разной чувствительностью и т.п.), изложены ее формальная постановка и примеры решения. Причем, в указанной работе рассматривается коммерческий критерий авиастроительной компании, максимизирующей прибыль от портфеля проектов³. При формировании требований к перспективным технологиям с общегосударственной точки зрения критерий экономической эффективности ВС может быть проще — минимизация суммарных эксплуатационных затрат (как операционных затрат, так и затрат на владение парком изделий).

Анализ целесообразности применения для рынков ПАНХ модульного принципа конструирования изделий авиационной техники и аддитивных производственных технологий

Можно ли совместить, на первый взгляд, диаметрально противоположные решения — унификацию и специализацию моделей? Тогда удалось бы улучшить оптимальные значения целевой функции в вышеописанной задаче формирования типажа ВС. Отчасти такие возможности существуют, известны и даже широко применяются в некоторых областях техники (прежде всего, в строительстве, где используются типовые кирпичи, блоки или

даже панели, элементы оборудования и т.п.). Для создания широкого спектра ВС, удовлетворяющих сильно варьирующим требованиям, но по возможности с высокой степенью унификации, может быть перспективным модульный принцип их конструирования.

Он особенно актуален, если требуется создавать изделия с характеристиками (прежде всего, конечно, массогабаритными), которые представляют собой «почти континуум» в широком диапазоне — варьируют на порядок и более. Именно такое распределение потенциальных областей применения и уровня требований к ВС является в рамках вышеописанной проблемы формирования типажа наименее благоприятным. Все-таки во многих известных сегментах рынков авиационной техники распределение уровня требуемых характеристик имеет выраженные «пики» в определенных областях, что и позволяет создавать для них относительно массовые модели. Однако, как показано в работах [2, 3], иногда распределение оптимальных или требуемых значений грузоподъемности и других показателей может быть почти равномерным в очень широком диапазоне.

С одной стороны, из дискретных модулей можно «набрать» лишь квазиоптимальное изделие, которое по уровню операционных затрат все-таки будет уступать специально созданному для данной функции или миссии. С другой стороны, поскольку используются типовые модули, они будут массовыми изделиями, причем, будут выпускаться для всех изделий. Это позволит, в свою очередь, сократить до возможного минимума себестоимость производства модуля, его ТОиР, логистического обеспечения эксплуатации, особенно, если на территориально распределенных площадках эксплуатируются относительно немногочисленные парки изделий (вообще, и тем более — конкретной размерности). Фактически для поддержания готовности даже полностью разнородного парка, состоящего из единичных изделий разной размерности, достаточно будет содержать запас одинаковых модулей.

³ Т.е. в более сложной постановке, поскольку суммарные эксплуатационные расходы в этой работе являются не критерием, а лишь промежуточным показателем, определяющим спрос потенциальных потребителей на БЛА. Далее полученный спрос определяет выручку и затраты разработчика и производителя всего семейства БЛА и в конечном счете его совокупную прибыль за весь их жизненный цикл. Она и является в указанной работе целевой функцией.

На основе изложенных здесь качественных предпосылок могут быть построены и математические модели стоимости производства, ТОиР и эксплуатации парков изделий, созданных по модульному принципу. При этом придется учитывать, что летно-технические и некоторые технико-экономические характеристики (прежде всего, расход топлива или иной энергии) модульных ВС в силу их «квазиоптимальности» лишь приблизительного соответствия требуемым для данной задачи (миссии) параметрам будут уступать характеристикам изделий, специально созданных для этой задачи, впрочем, как правило, ненамного. Далее останется сопоставить полученные суммарные затраты с минимально достижимыми затратами, определенными в модели оптимального модельного ряда традиционных, «немодульных» изделий.

Из типовых модулей могут набираться:

— комплекс бортового оборудования (в т. ч. система управления ЛА, датчики и исполнительные механизмы, и т. д.);

— топливная система или, шире, система хранения энергии на борту (в т. ч. электрической, что реализуется, например, путем формирования аккумуляторных или конденсаторных батарей из типовых элементов);

— при наличии — система преобразования энергии, например, на основе топливных элементов;

— двигатели и движители, особенно при выборе в пользу распределенной силовой установки, которая, как правило, имеет множество относительно малоразмерных воздушных винтов или несущих винтов.

Существенно меньше возможности использования модульного принципа проектирования в планере ВС. Как правило, планер должен обеспечивать высокое аэродинамическое совершенство, что требует его проектирования как единого целого. В свою очередь, при масштабировании ВС действует «закон квадрата-куба», т. е. при увеличении линейных размеров в n раз, площадь поверхностей возрастает в n^2 раз, а масса, как правило, пропорционально n^3 . И наоборот, при увеличении массы ВС в n раз линейные размеры должны увеличиться приблизительно в $\sqrt[3]{n}$ раз, т. е. совсем непропорционально. Однако в ряде случаев от планера не требуется обеспечивать высокий уровень аэродинамического совершенства

ВС. Например, для малоскоростных ВС (а требуемые скорости полета ВС для многих из обсуждаемых задач, как отмечено выше, как раз лежат в пределах 200–300 км/ч или даже менее) он нередко представляет собой в основном силовую конструкцию, несущую все системы ВС и полезную нагрузку [9], а не обтекаемый корпус, тогда и в части планера приемлем модульный принцип проектирования ВС. Силовая конструкция, несущая система (при наличии) и контейнеры для размещения полезной нагрузки в этом случае также могут быть модульными.

В то же время, если планер все-таки призван обеспечивать высокое аэродинамическое совершенство ВС, могут быть эффективными технологии гибкого производства корпуса летательных аппаратов (ЛА) с аэродинамическими обводами, оптимизированными «под» заданную размерность и другие требования. Наиболее вероятно использование в этом качестве аддитивных технологий и полимерно-композиционных материалов (ПКМ).

Обеспечение возможности единичного или малосерийного производства элементов планера требует также технологий проектирования планера «под» заданные требования. Строго говоря, технологии гибкого проектирования потребуются не только для аэродинамического корпуса и силового набора планера ВС, но и для ВС в целом, даже если его силовая установка и бортовое оборудование «набираются» по модульным принципам. По меньшей мере, необходимо обоснованно выбрать состав и количество типовых модулей, сбалансировать их состав и размещение, интеграцию всех систем между собой и с планером для обеспечения заданных эксплуатационных характеристик и безопасности полетов. Эта задача часто не может быть корректно решена экспертным путем и требует автоматизации расчетов и подготовки принятия проектных решений. Эти факторы и делают актуальными технологии автоматизированного проектирования ВС под заданные требования с использованием как модульного оборудования, так и гибких производственных технологий.

Немногочисленность распределенных парков изделий, особенно однотипных (на каждой площадке они могут быть и единичными), диктует и новый принцип организации авиационной

тельного производства и послепродажного обслуживания. Поскольку под каждую задачу или миссию создается фактически уникальное (или очень малосерийное) ВС, целесообразно перенести его окончательное производство к месту будущего базирования и применения. При этом централизованно производятся и доставляются по всем пунктам распределенной сети:

— типовые модули вышеперечисленных групп;

— стандартные материалы и оборудование для автоматизированного гибкого производства (и, возможно, ремонта) планера по аддитивным или другим аналогичным технологиям.

Децентрализация производства планера наиболее целесообразна в тех случаях, когда такие изделия требуются относительно часто в силу:

— малой долговечности (из-за частых повреждений в эксплуатации, либо если они преднамеренно выполняются практически одноразовыми);

— изменчивости задач и миссий, под каждую из которых может быть собрано уникальное ВС с использованием типовых модулей, которые по окончании миссии будут повторно использованы уже в других изделиях.

В этих случаях распределенное производство также обеспечит выигрыш во времени выполнения быстро возникающих задач, поскольку при централизованном производстве необходимых ВС тратилось бы значительное время на их доставку к месту эксплуатации и выполнения миссии. Такая распределенная сетевая структура авиастроения (в данном сегменте преимущественно беспилотных или легких и сверхлегких пилотируемых ВС) представляет собой значительное изменение облика отрасли.

Вышеописанные разнообразные требования к ВС для новых и развивающихся сегментов рынка ПАНХ фактически диктуют требования не столько к продуктовым технологиям, сколько к производственным. Количественный анализ прогнозируемых здесь инноваций, формирование объективных требований к параметрам рынков и технологий требуют разработки математических моде-

лей, построенных на приведенных здесь качественных предпосылках.

Литература

1. Андреевский В. В. Экономические аспекты выбора типажа и структуры парка перспективных отечественных магистральных пассажирских самолетов // Полет. — №1. — 1999. — С. 55–60.

2. Карпов А. Е., Клочков В. В. Инновационные транспортные системы как основа новой пространственной организации экономики Сибири и Дальнего Востока // Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. — 2018. — Вып. 13, ч. 2. — С. 326–335.

3. Карпов А. Е., Клочков В. В. Прогнозирование эффективности создания транспортно-логистических систем на основе беспилотных воздушных судов / Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва). — М.: ИПУ РАН, 2018. — Т. 2. — С. 292–302.

4. Клочков В. В. Организация конкурентоспособного производства и послепродажного обслуживания авиадвигателей — М.: Экономика и финансы, 2006. — 464 с.

5. Клочков В. В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты — М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. — 124 с.

6. Клочков В. В., Никитова А. К., Ефимова Н. С. Экономическое обоснование основных направлений разработки авиационной техники (на примере беспилотных летательных аппаратов) // Вестник Московского авиационного института. — 2009. — С. 82–91.

7. Никитова А. К., Клочков В. В. Методы прогнозирования спроса на беспилотные летательные аппараты и работы по воздушному патрулированию // Проблемы прогнозирования. — М.: ИНИП РАН, 2007. — №6.

8. Wright T. P. Factors Affecting the Cost of Airplanes // Journal of Aeronautical Sciences. — Vol. 3. — February 1936. — Pp. 122–128.

9. SKYF — тяжелый авиагрузовой дрон [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://skyf.pro/ru/skyf-ru/>.



Клочков Владислав Валерьевич — доктор экономических наук, кандидат технических наук, заместитель генерального директора Национального исследовательского центра «Институт им. Н.Е. Жуковского», ведущий научный сотрудник лаборатории 67 Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Область научных интересов: управление научно-технологическим развитием, экономика высокотехнологичной промышленности, экономико-математическое моделирование. Опубликовал свыше 400 научных работ, в т. ч. свыше 200 статей в рецензируемых научных журналах.

Klochkov Vladislav Valerievich — Doctor of Economic Science, Candidate of Engineering Science, Deputy General Director of the National research center «Institute named after N. E. Zhukovsky», leading researcher of the laboratory 67 of the V. A. Trapeznikov Institute of management problems of Academy of Sciences. Majors in management of scientific and technological development, economics of high-tech industries, mathematical economics. The author of more than 400 printed research works, among them over 200 papers in reviewed high level journals.

125319, г. Москва, ул. Викторенко, 7
7 Viktorenko st., 125319, Moscow, Russia
Тел.: +7 (916) 177-01-30; e-mail: vlad_klochkov@mail.ru
