

# ОЦЕНКА РЕАЛИЗУЕМОСТИ ТРЕБОВАНИЙ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ НА РАЗРАБОТКУ САМОЛЕТА И ЕГО СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

**Е.С. Шапошников**, заместитель директора программы, ПАО "Туполев",  
**А.Н. Андреев**, начальник кафедры УВП МО РФ, ФГБОУВО "МАИ" (НИУ)

*В статье рассмотрен подход по количественной оценке реализуемости требований тактико-технического задания на начальном этапе проектирования.*

*The article considers an approach to quantify the feasibility of the requirements of the tactical and technical task at the initial stage of design.*

**Ключевые слова:** авиационный комплекс, силовая установка, случайная величина, вероятность, методы оценки уровня риска, эскизно-технический проект, реализуемость требований.

**Keywords:** aircraft, power plant, random variable, probability, methods for assessing the level of risk, draft and technical design, feasibility of requirements.

На этапе эскизно-технического проекта (ЭТП) авиационного комплекса (АК) и его силовой установки (СУ) определяются окончательные технические решения, дающие полное представление о разрабатываемом изделии, и обосновывается реализуемость всех требований, заданных в тактико-техническом задании (ТТЗ). Однако заданные в ТТЗ количественные и качественные требования часто являются взаимозависимыми и вступают в противоречие друг с другом, что приводит к невозможности их одновременного достижения. Показатель реализуемости требований ТТЗ на разрабатываемую систему является одним из ключевых и в настоящее время оценивается субъективно и только качественно.

Особенно большое внимание уделяется проблеме оценке рисков в сфере реализации государственного оборонного заказа. В работах [1, 5, 7, 8, 9, 12, 13] излагается теоретическая база и понятийный аппарат решения задачи оценки уровня риска выполнения ТТЗ, а в работах [2, 6, 8, 9, 11] обосновываются общие методические подходы по качественному и количественному анализу, оценке и снижению рисков создания перспективных образцов изделий военной техники. В работах развиты модели, позволяющие решать отдельные задачи: оценивать и оптимизировать временные и стоимостные параметры проекта [4], оценивать выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при известных характеристиках предприятия [10]. Тем не менее, проблема количественной оценки технических рисков создания сложных технических систем на начальных этапах проектирования не рассмотрена в должной степени.

Высокая степень неопределенности в назначении показателей совершенства элементов разрабатываемого АК и его СУ не дает возможности с уверенностью прогнозировать выходные интегральные летно-технические характеристики (ЛТХ). К показателям совершенства в данном случае относятся весовые показатели двигателя и подсистем АК, тягово-экономические характеристики СУ (Рисунок 1 и 2), аэродинамики самолета.

В соответствии с принятой методологией проектирования работы проводятся с помощью детерминированных моделей, исходные данные в которых однозначно определены, но которые в то же время еще предстоит достичь в процессе проектирования. На начальных этапах проектирования исходные данные выбираются исходя из опыта конструкторов, задела по предыдущим проектам и прогнозов общемирового развития технических систем. Детерминированная модель не учитывает элемент неопределенности в выборе исходных данных, связанный с отсутствием необходимой информации на начальных этапах проектирования и недостаточной изученностью процессов. Неточности в количественном назначении исходных данных оказывают существенное влияние на выходные интегральные характеристики и не позволяют сделать объективный вывод о реализуемости требований ТТЗ.

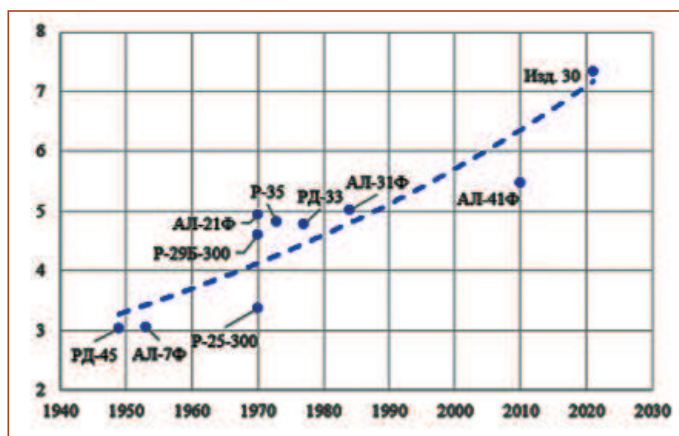


Рис. 1 Удельная тяга кгс/кг

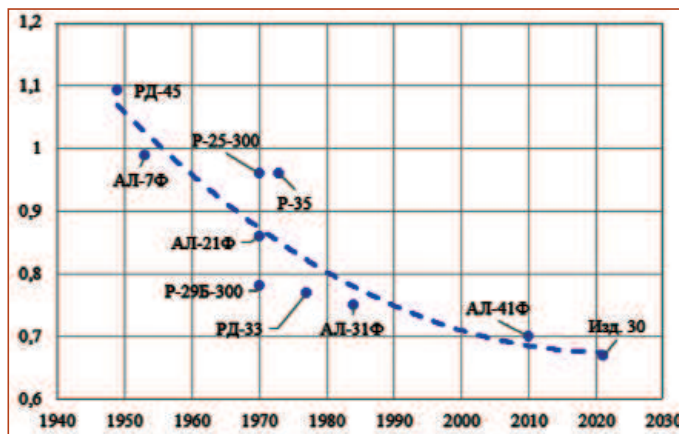


Рис. 2 Удельный расход топлива, кг/кгс·ч

В процессе проектирования необходимо однозначно понимать реальные возможности создаваемой системы и степень риска невыполнения заданных требований, которая может быть выявлена в результате применения статистических методов, позволяющих учесть реальную вероятность сочетания отклонений различных параметров двигателя, СУ и летательного аппарата от назначенных номинальных значений.

Данный подход не получил широкого распространения в практике создания авиационной техники, но вероятностные оценки летных данных создаваемых самолетов и двигателей были выполнены в ряде работ [14, 15], а текущая актуальность подхода отмечена в работе [16]. Подобная задача решалась при рассмотрении влияния на ЛТХ погрешностей поддержания регулируемых параметров самолета и двигателя [17, 18].



Количественно оценить риск невыполнения требований ТТЗ возможно в стохастической постановке, задав исходные данные в виде законов распределения.

При этом под исходными данными будут

пониматься параметры технической системы, оказывающие влияние на заданные к ней требования, так называемые факторы риска. Для каждой конкретной системы факторы риска, вносящие неопределенность, будут различаться и должны определяться конкретно. Их взаимовлияние должно быть мало или вовсе отсутствовать. Это определяется с помощью имеющихся у разработчика математических моделей (ММ) технических систем.

Вероятность достижения заданных требований разрабатываемых технических систем рассмотрим на примере влияния неопределенности в исходных данных по СУ на достижение требуемой дальности крейсерского полета АК.

В вероятностной постановке неопределенность исходной информации по СУ может учитываться как заданием отклонений интегральных характеристик (тяги R и удельного расхода топлива CR) на основных режимах работы двигателя, так и более детальным рассмотрением риска отклонения характеристик ее узлов от прогнозируемых значений.

Применение первого подхода целесообразно на начальных этапах разработки двигателя, когда невозможно с высокой долей уверенности спрогнозировать большой массив параметров практически всех его элементов, а включение их в число факторов риска значительно усложнит рассмотрение проблемы. К тому же возможная ошибка в назначении какого-либо случайного фактора может сильно повлиять на окончательный результат исследования.

Однако при создании двигателя на базе уже существующих и в значительной степени отработанных элементов, позволяющих значительно сократить массив рассматриваемых случайных факторов, более привлекательным представляется второй вариант.

При этом имеется большое количество параметров, оказывающих влияние на работу сложных технических систем, поэтому обеспечить контроль и одновременное достижение нескольких десятков взаимозависимых параметров является сложной организационно-технической задачей. Оценку влияния факторов на целевые функции в первом приближении целесообразно производить с помощью коэффициентов влияния, которые характеризуют изменение значения критерия при 1% - ом приращении (либо уменьшении) величины рассматриваемого параметра относительно номинального значения. Определив факторы, оказывающие наибольшее влияние, для удобства дальнейших расчетов целесообразно минимизировать их количество, используя закон Парето.

Основная сложность этой работы заключается в обоснованном прогнозе возможного диапазона отклонения основных исходных параметров системы от их проектных значений, а также назначении закона их распределения в пределах установленного диапазона. Границы, за пределы которых данный параметр ни при каких условиях выйти не может, всегда возможно определить. Закон распределения может быть симметричным, несимметричным или равномерно распределенным при высокой степени неопределенности. Его можно назначить только экспертным путем, основываясь на опыте проектирования и статистике.

Для задания закона распределения удобно использовать  $\beta$ -распределение, дающее возможность заданием двух параметров ( $\beta$  - параметр, ответственный за форму распределения и  $\beta$  - параметр, ответственный за масштаб), получать самые различные законы: от нормального усеченного до близких к равномерному. Примеры  $\beta$ -распределения и зависимость получаемых законов от параметров формы показаны на рисунке 3.

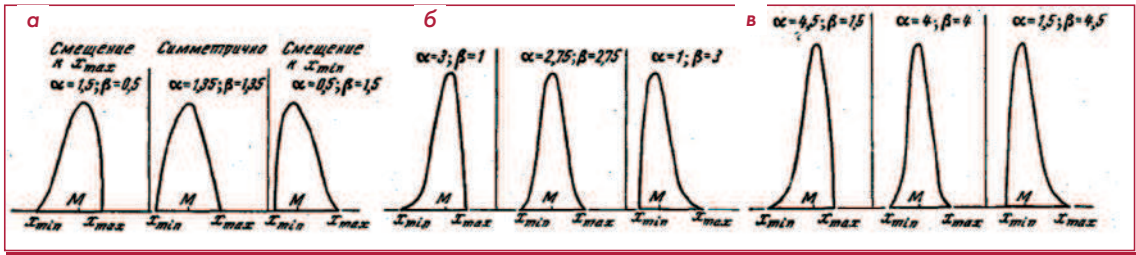


Рис. 3 Пример  $\beta$ -распределения с большой  $\alpha$ , средней  $\beta$  и малой  $\beta$  степенями неопределенности

Пример сформированных таким образом на основании экспертной оценки законов и вероятностей распределения факторов риска показаны на рисунках 4, 5 и 6.

Оценка уровня риска исследуемой технической системы мо-

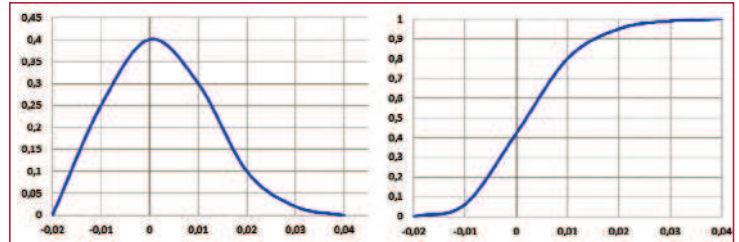


Рис. 4 Отклонение коэффициента неоднородности потока за воздухозаборником от прогнозируемых величин

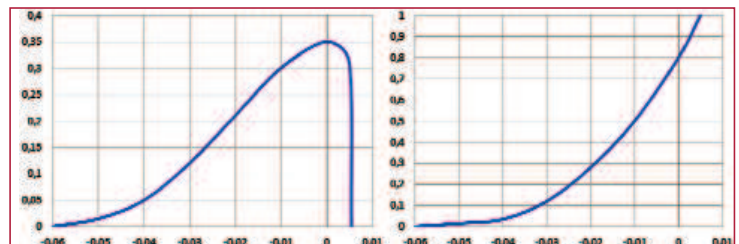


Рис. 5 Отклонение коэффициента сохранения полного давления во входном устройстве от прогнозируемых значений

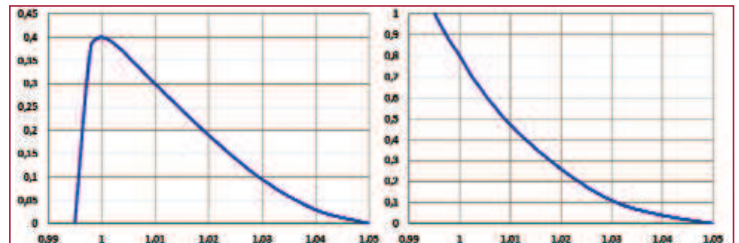


Рис. 6 Отклонение коэффициента скорости истечения из сопла от прогнозируемых значений

жет производиться с использованием различных качественных подходов, таких как метод мозгового штурма, представляющего собой обсуждение системы группой специалистов-экспертов, метод построения матрицы вероятности - последствий, являющийся средством объединения качественных или смешанных оценок последствий и вероятностей для ранжирования риска, метод оценки риска в баллах, в основу которого положена техника качественной оценки уровня критичности риска, определяемой как произведение оценок его вероятности и ожидаемой тяжести последствий реализации - уровень воздействия, а также многих других [12].

Применение данных подходов целесообразно на самых ранних стадиях проектирования, когда отсутствует ММ исследуемой технической системы или невозможно ее использовать для оценки влияния случайных факторов на выходные характеристики системы.

Также следует отметить, что методика качественной оценки риска не дает представления о степени реализуемости заданных требований и вольно трактует назначение вероятности и уровня воздействия, поэтому при выборе облика сложной технической системы целесообразно применять количественные методы оценки риска.

Исследование влияния случайных факторов в выбранных диа-

пазонах их применения на выходные характеристики объекта нередко проводятся с использованием простых предельных методов, например "метода наихудшего случая", когда величины выбранных случайных факторов принимаются равными своим наихудшим значениям, максимально ухудшающими выбранные критерии технической системы.

Однако такие подходы не позволяют оценить реальный риск достижения тактико-технических характеристик (ТТХ) системы, а использование без специальной обработки количественных результатов, полученных с помощью таких методов приводит к необоснованному завышению требований к допустимым отклонениям случайных факторов.

Поэтому более корректное представление о соотношении влияния на летные данные самолета выбранных случайных факторов целесообразно получать на основании вероятностных методов.

Из применяемых на практике статистических методов оценки распределения выходных характеристик рассматриваемой системы наиболее простым, достаточно надежным и не очень трудоемким является метод статистического моделирования, известный еще как метод Монте-Карло.

При использовании метода Монте-Карло для моделирования воздействия случайных факторов на исследуемый объект существуют три различных способа:

- прямое подключение ММ к модулю Монте-Карло;
- подключение модуля Монте-Карло к аппроксимирующей ММ исследуемого объекта модели;
- подключение ММ к аппроксимирующей метод Монте-Карло модели.

Первый метод позволяет наиболее точно моделировать заданные законы распределения случайных факторов. Однако для этого требуется довольно большое количество статистических испытаний - более 10 000 и, соответственно, довольно большие затраты времени на расчет.

Во втором методе используется аппроксимация ММ. В качестве аппроксимирующих можно задействовать регрессионные зависимости и нейронные сети. Для определения коэффициентов аппроксимационной зависимости насчитываются значения критериев оценки по заданному плану эксперимента. Коэффициенты определяются методом наименьших квадратов. При этом важно получить удовлетворительную точность аппроксимирующей зависимости.

В третьем методе исследуемая ММ не упрощается, а выполняется аппроксимация результатов моделирования метода Монте-Карло с приемлемым уровнем точности вычисления. Данный метод основан на так называемом методе быстрой интеграции вероятности (FPI - fast probability integration [19]), который, в свою очередь, был создан на базе метода наиболее вероятной точки (MMP - most probable point).

Последовательность работы модуля статистического моделирования, следующая:

- для заданного количества случайных факторов формируется план эксперимента (значения множителей для определения значений факторов и количество испытаний);
- формирование плана эксперимента с рассчитанными значениями факторов по заданному диапазону их изменения в соответствии с законом распределения;
- расчет критериев по плану эксперимента;
- определение коэффициентов регрессионных моделей критериев методов наименьших квадратов;
- определение распределения плотности вероятности и вероятности критериев.

Пример результата моделирования дальности крейсерского полета самолета представлен на рисунке 7, здесь же представлена вероятность получения данной характеристики самолета. По зависимостям, представленным на рисунке 7, можно определить значения выбранных критериев при приемлемом уровне риска, в

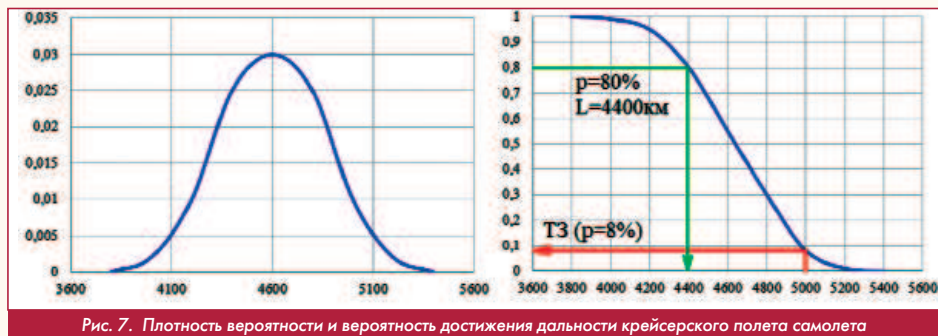


Рис. 7. Плотность вероятности и вероятность достижения дальности крейсерского полета самолета

качестве допустимой границы которого принято значения вероятности  $p=80\%$ .

На данном примере продемонстрирован методический подход к рассмотрению вероятности достижения заданных требований разрабатываемого самолета и его силовой установки, который позволит оценить возможность достижения заданных ТТЗ требований.

### Литература

1. Елисеев О.Е. Управление рисками в контрактации // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования: Научный интернет-журнал. 2012. - № 3(7);
2. Подольский А.Г., Косенко А.А. Методические подходы к снижению рисков, сопутствующих реализации мероприятий по созданию продукции военного назначения. Вооружение и экономика № 3 (19). 2012 г.
3. Спицин А.Г., Хмелевой В.В. Анализ рисков в проектировании авиационной техники. Вооружение и экономика № 3 (15), 2011 г.
4. Жеребин А.М., Кропова В.В., Русак М.А. Методологический инструмент оценки рисков реализации программ и планов создания авиационной техники // Электронный журнал "Труды МАИ", выпуск № 55.
5. Лавринов Г.А., Подольский А.Г. Содержание понятий неопределенности и риска в области формирования и реализации планов развития ВВТ // Вооружение и экономика. - 2010. - № 1(9).
6. Аношко А.В., Дзема Ю.М., Петренко С.Г., Методические основы оценки промышленной реализуемости программ создания перспективных образцов авиационной техники и вооружения. - Военная мысль № 1 2009.
7. Буренок В.М., Лавринов Г.А., Хрусталев Е.Ю. Механизмы управления производством продукции военного назначения. - М.: Наука, 2006.
8. Лавринов Г.А., Козин М.Н. Управление рисками в системе государственного оборонного заказа - М., 2007.
9. Макеев С.П., Минаев В.Н., Матиевский А.В., Ларионов Г.А., Латышев Н.В. Автоматизация процессов управления рисками программ и проектов в сфере ГОЗ. Монография. - ЗНП АО "Отделение ПВЭиФ", 2011.
10. Буравлев А.И. Управление высокотехнологичными проектами на стадии НИОКР. Вооружение и экономика № 3 (32). 2015 г.
11. Печатнов Ю.А., Мунтяну А.В. Об одном подходе к оцениванию рисков при реализации программы развития комплексов стратегического ракетного вооружения. Вооружение и экономика № 4 (41). 2017 г.
12. ГОСТ Р 58045 - 2017.
13. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011.
14. Данилов В.Е., Исаев В.К., Рябов А.М., Шкадов Л.М. Статистическая оценка характеристик проектируемого самолета с помощью метода Монте-Карло. Ученые записки ЦАГИ, Т. 4, 1973, № 2. С. 137...142.
15. Труды ЦИАМ 2005.
16. Клягин В.А., Лаушин Д.А. Учет рисков, связанных с достижением летно-технических характеристик самолета. Полет, 2019 (01), с. 28-32.
17. Югов О.К., Селиванов О.Д., Дружинин Л.Н. Оптимальное управление силовой установкой самолета. М.: Машиностроение, 1978. 204 с.
18. Югов О.К., Селиванов О.Д. Основы интеграции самолета и двигателя. - М.: Машиностроение, 1989. - 304 с.: ил.
19. Southwest Research Institute, FPI User's and Theoretical Manual, San Antonio, TX, 1995.

Связь с авторами: [Essh91@mail.ru](mailto:Essh91@mail.ru)  
[3212594@mail.ru](mailto:3212594@mail.ru)

