

# ОЦЕНОЧНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИИ САМОЛЁТА ВСЛЕДСТВИЕ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕДОПУСТИМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Пелих Е.А., Титов Е.И.

Московский Авиационный Институт (научно-исследовательский университет),  
Москва, Россия

evgeniipelikh@gmail.com, titovei@mai.ru

*Аннотация. Современные методы проектирования и сертификации авиационной техники обеспечивают высокую надежность проектных решений, однако возникающие в процессе проектирования конструктивные недочеты могут потребовать перепроектирования некоторых элементов. В работе проводится оценка целесообразности исследования стоимости перепроектирования при различных сценариях.*

*Ключевые слова: авиационная техника, стоимость, проектирование, прочность.*

## Введение

Ошибка при проектировании - это ненамеренный изъян в конструкции воздушного судна на этапе проектирования ЛА, способный привести к существенному снижению потенциальных характеристик проектируемого ЛА, либо к разрушению конструкции. Обнаружение ошибок происходит как на ранних этапах жизненного цикла изделия, так и на более поздних, когда проект уже реализован. Работы по исправлению ошибок могут потребовать существенных временных и денежных ресурсов, вследствие чего необходимо провести оценку целесообразности увеличения расходов на этапе первичных прочностных расчетов конструкции летательного аппарата в целях недопущения больших затрат в будущем.

## 1. Процесс проектирования летательного аппарата

Проектирование является сложным, многоэтапным процессом. Существенным является то, что этот процесс обычно итерационный, причем итерации осуществляются не только между основными этапами проектирования, но и внутри каждого из них. От того, насколько правильные решения принимаются на ранних этапах, часто зависит судьба проекта, и не только потому, что ошибки, допущенные на ранних этапах разработки проекта, приводят к слишком большим затратам средств и времени на его доработку в процессе рабочего проектирования и постройки, но и потому, что от них может вообще зависеть возможность реализации проекта [1].

Ошибки, допущенные при проектировании, часто обнаруживаются и исправляются на более поздних этапах жизненного цикла изделия, однако в зависимости от того, до какого этапа изъян в конструкции смог пройти до обнаружения, зависит и стоимость внесения изменений в конструкцию [2].

В жизненном цикле авиационной техники в разных интерпретациях выделяют разное количество этапов. Основные из них: маркетинговые исследования (анализ спроса, или постановка задачи в виде конкурса со стороны правительства), проектирование, испытания, производство, эксплуатация и утилизация. В данном случае работы по разработке вновь проектируемого воздушного судна ведутся в рамках этапов непосредственно проектирования и испытаний. В свою очередь этап проектирования складывается из двух основных составляющих:

- Внешнее проектирование, в рамках которого происходит определение потребных объемов грузопассажирских перевозок или задач вида военной авиации, определение типажа парка самолетов и формирование технического задания.
- Внутреннее проектирование, которое, в данном случае, следует рассмотреть более детально.

Первым этапом внутреннего проектирования является анализ возможности реализации ТЗ и определение облика и проектных параметров самолета. Результатом этого этапа является техническое предложение или аванпроект. В аванпроект входят:

- Материальный облик летательного аппарата.
- Общий вид.
- Летно-технические характеристики, масса.
- Предложенные базовые технологии, сроки и стоимость реализации.
- Сравнение с заданным тактико-техническим заданием.

- Оценка аэродинамических характеристик летательного аппарата (изготовление модели).

Объём и детализация представленных на этапе аванпроекта данных о проектируемом изделии позволяет сказать, что большая часть решений, формирующих внешний облик летательного аппарата приняты именно на этом этапе. Внесение изменений в конструкцию по результатам работы на последующих этапах выполняется при обнаружении существенных недостатков при расчетах на этапе аванпроекта [3]. Издержки, понесенные из-за нерациональных решений на этапе разработки аванпроекта, увеличивают сроки и стоимость выполнения работ. Вопросам сложности синтеза посвящено большое количество литературы. Именно в силу высокой сложности этапа, необходимости взаимочета бесчисленного количества факторов, потребности в приоритизации возникают конструкторские недочеты.

Аванпроект проходит проверку со стороны основных, наиболее компетентных в области летательных аппаратов организаций, таких как ЦАГИ и другие НИИ. Эта мера необходима для заблаговременного выявления ошибок и недочетов с целью снижения вероятности необходимости возврата к аванпроекту с целью его доработки уже на последующих этапах проектирования.

Следующим после аванпроекта этапом является разработка эскизного проекта летательного аппарата. На этом этапе происходит уточнение облика и параметров самолета, его компоновки и экспериментальное исследование аэродинамики. К окончанию создания эскизного проекта около 80% решений относительно будущего летательного аппарата уже приняты.

Дальнейшая работа проводится на этапах рабочего проектирования, когда проектируются детали и узлы летательного аппарата, прорабатывается технология сборки [4]. По завершению разработки конструкторской документации изготавливаются опытные образцы, проводятся стендовые и натурные испытания. По мере проведения испытаний выявляются недочеты конструкции, конструкторская документация дорабатывается для устранения допущенных при выполнении предыдущих этапов ошибок. Алгоритм создания проектной документации идёт по пути нахождения оптимума между несколькими параметрами, такими как экономическая эффективность, безопасность полётов, технологичность и т.д.

Современный процесс проектирования летательных аппаратов позволяет сократить сроки и повысить качество проектирования, в том числе за счет привлечения сторонних организаций. В частности, проведение некоторых прочностных и аэродинамических расчетов производится силами научно-исследовательских институтов, университетов и лабораторий, обладающих достаточными компетенциями в области подобного рода исследований.

## **2. Метод конечных элементов в расчетах на прочность**

Проектирование, конструирование и сертификация авиационной техники во многом основана на прогнозировании поведения конструкции под действием тех или иных внешних нагрузок. До 80-х годов 20-го века такое прогнозирование основывалось либо на натурном испытании, что чрезвычайно дорого в проведении, либо на аналитическом расчёте. Однако, для какого-либо возможного расчёта аналитическим методом вводится большое количество допущений в математическую модель, что может давать серьёзную погрешность. Для избегания ошибок при проектировании конструкции, при расчёте аналитическим методом вводятся коэффициенты безопасности, включение которых в расчётные формулы с достаточной точностью позволяет полагать, что конструкция выдержит расчётные нагрузки.

Однако, даже имея большие коэффициенты безопасности, которые, очевидно, увеличивают массу конструкции самолёта, а, следовательно, ухудшают все его лётные характеристики, аналитический метод имел слишком большие допущения для более тонких расчётов. Таких как безопасное отделения маршевой силовой установки (МСУ) и основных опор шасси (ООШ) при грубых посадках [5-8], т.к. данная задача решается только в динамической нелинейной постановке.

С развитием компьютерных мощностей, на смену аналитическому расчёту пришли методы конечного интегрирования. В частности, метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод основан на разбиении сложной формы геометрии конструкции на простейшие конечные элементы (КЭ) [9]. Данный КЭ имеет так называемую матрицу жёсткости – систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которые устанавливают связь между перемещениями узлов конечного элемента и жёсткостью, т.е. реакцией на перемещение данного узла от воздействия внешних сил. Современные суперкомпьютеры способны решать сложнейшие задачи, включающие в себя миллионы таких КЭ, составляющих в совокупности глобальную конечно-элементную модель.

Данный анализ поведения конструкции стоит достаточно дорого, даже с учетом решения проблемы трудоёмкости расчёта аналитических уравнений путём их замены МКЭ. Современные инженеры

сталкиваются с проблемой необходимости проведения такого анализа на каждом этапе проектирования ЛА.

### 3. Оценка целесообразности исследования

Данное исследование призвано доказать целесообразность проектирования наиболее высокой степени точности в целях минимизации возможных издержек на перепроектирование конструкции летательного аппарата. В зависимости от этапа жизненного цикла, на котором требуется внести изменения в конструкции, стоимость перепроектирования может существенно возрасти. Однако следует отметить, что стоимость этапа проектирования составляет около 10% от стоимости летательного аппарата, с учетом того, что на этапе проектирования принимается 80% решений относительно будущего летательного аппарата [10]. Помимо этого, точному расчету этапа проектирования препятствует парадокс оценки стоимости, при котором уточнение стоимости происходит только по истечению некоторого количества времени, когда появляется дополнительная информация [11].

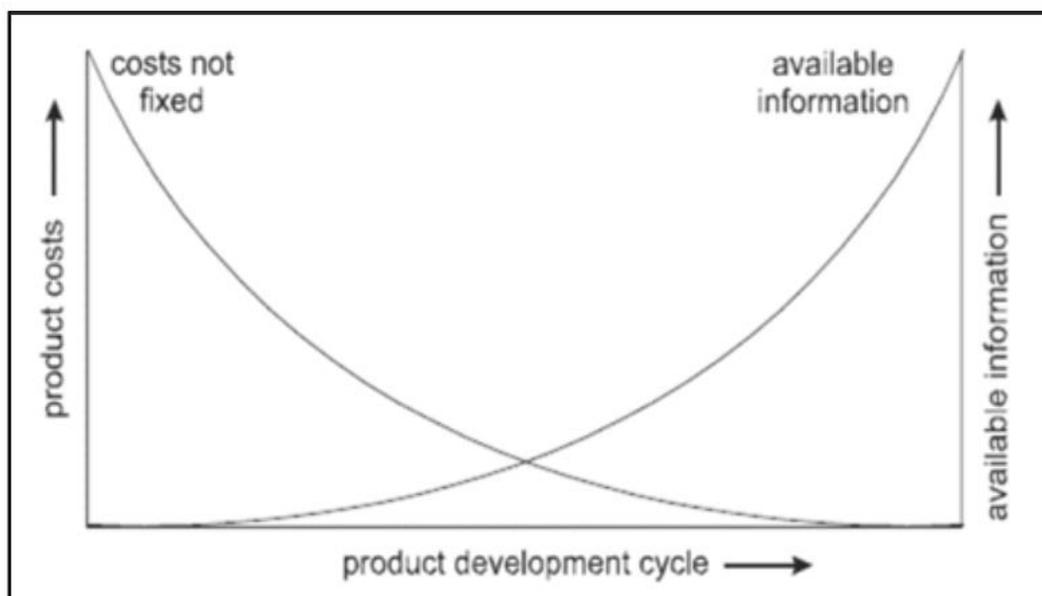


Рис. 1. Парадокс оценки стоимости

Особенностью формирования прибыли от реализации проекта создания летательного аппарата является то, что на начальном этапе разработки необходимы большие объемы вложений и на окупаемость проект выходит только при выпуске определенного объема партии изделий. Большая часть стоимости проекта формируется на этапе эксплуатации [12]. Задача исследования в данном случае лежит в области некоторого роста первоначальных затрат с целью увеличения прибыли после выхода на самоокупаемость проекта.

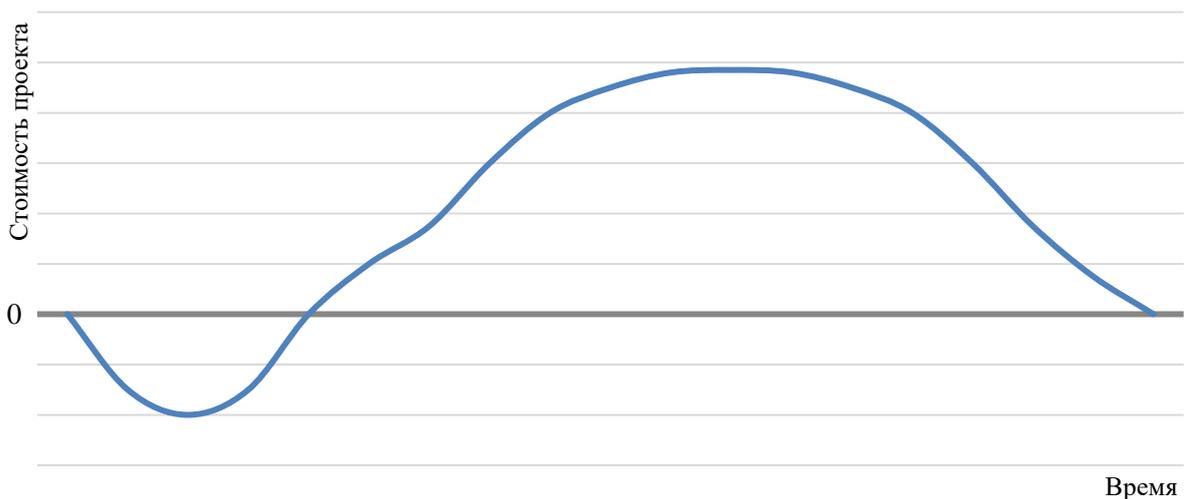


Рис. 2. Формирование стоимости проекта в течение жизненного цикла изделия

Накопление определенной проделанной работы мешает компании отказаться от проекта в пользу изменения его характеристик, возвращения к более ранним этапам и принятия альтернативных решений. Если после детального проектирования выясняется, что проект слишком дорогой, многие компании пытаются снизить стоимость, меняя, например, материалы или производственный процесс, вместо того чтобы перепроектировать проект с учетом затрат, которых можно избежать. Следовательно, неверное решение на ранней стадии проектирования может обернуться большими затратами на последующих этапах разработки, учитывая, что производственные модификации и изменения технологического процесса тем дороже, чем позже они происходят [13].

Декомпозиция жизненного цикла летательного аппарата в одной из интерпретаций [14] представлена шестью этапами:

- Планирование и концептуальное проектирование.
- Предварительное проектирование и интеграция систем.
- Детальное проектирование и разработка.
- Производство и приобретение.
- Эксплуатация и поддержка.
- Утилизация.

В работе будут рассматриваться этапы от планирования и концептуального проектирования до эксплуатации и поддержки включительно для моделирования затрат на перепроектирование и изменение конструкции вследствие неточностей при первоначальной обработке моделей. Этап утилизации не учитывается в модели, поскольку изменения в конструкции не влияют на эксплуатационные характеристики летательного аппарата на этом этапе.

Следует также помнить, что перепроектирование конкретных деталей и узлов влечет за собой потребность в пересмотре прочностного анализа всей конструкции летательного аппарата (если изменение достаточно существенное). Это связано с тем, что изменения в конструкции могут повлечь за собой и изменения массы, и изменения прочностных характеристик конкретной области, в которой проводится перепроектирование [15].

В некоторых случаях, если изменения, вносимые в конструкцию при перепроектировании, достаточно существенны, стоимость внесения изменений (в зависимости от того, насколько далеко по жизненного цикла смог продвинуться летательный аппарат) может превышать изначальную стоимость проектирования агрегата и уже понесенные затраты.

Наша гипотеза состоит в том, что намного более предпочтительно увеличить затраты на первоначально более качественное проектирование, чем нести дополнительные затраты на перепроектирование, когда изделие уже достигло этапов производства или эксплуатации.

#### 4. Постановка задачи исследования

Для построения математических моделей будут проанализированы несколько вариаций возможных сценариев.

#### 4.1. Классификация ошибки

Прежде всего, напомним определение ошибки при проектировании. Ошибка при проектировании – это непреднамеренный недостаток в конструкции летательного аппарата, ухудшающий его эксплуатационные характеристики или показатели безопасности. Мы не принимаем во внимание фактор того, как ошибка появилась, и на каком из подэтапов проектирования, поскольку это не влияет на конечный результат исследования. В зависимости от того, в каком из агрегатов летательного аппарата была допущена ошибка, её перепроектирование может быть сопряжено с:

- Точечным перепроектированием одного или нескольких узлов летательного аппарата. При этом внесенные изменения не оказывают существенного влияния на прочностные или массовые характеристики агрегата, частью которого этот узел является. Например, болт или кронштейн, масса которого при перепроектировании увеличилась не более, чем на 10%.
- Перепроектированием, оказывающим влияние на сборочный элемент, в который этот узел входит, требующий оценки целесообразности пересчета прочностных или массовых характеристик конструкции сборочного элемента.
- Перепроектированием, требующими пересчета прочностных и массовых характеристик агрегата.

Из представленной классификации видно, что чем большее число структурных элементов конструкции задействовано при изменении в соответствии с новыми требованиями (задачей на перепроектирование), тем больший объем работ требуется выполнить.

#### 4.2. Классификация по сроку существования летательного аппарата

В зависимости от того, на каком этапе существования находится проектируемый летательный аппарат, стоимость его перепроектирования будет разной. Мы классифицируем срок существования летательного аппарата по этапам жизненного цикла. Если ошибка была обнаружена, когда летательный аппарат находится на этапе:

- Предварительного проектирования, когда детализация конструкции ещё не проведена, внесение изменений будет сопряжено с изменением цифровой модели летательного аппарата. В этом случае затраченные ресурсы будут несущественными и потенциальной проблемой может стать только изменение конструкции, влекущее за собой изменение характеристик будущего летательного аппарата.
- Детального проектирования, когда предварительная детализация уже проведена, то есть известны объёмные ограничения, облик уточнен в достаточной степени точности и расположение различных систем и агрегатов летательного аппарата утверждено, изменение может повлечь за собой потребность в согласовании отделов проектирования всех тех систем, которые затрагиваются вносимыми изменениями. Если изменение существенно, это может потребовать дополнительного объема работ со стороны этих отделов.
- Производства и приобретения, это создает потребность не только в пересмотре цифровой модели и проведении дополнительной оценки, но и в изменении конструкции существующего в физической форме объекта или объектов, а значит и дополнительных затратах на производство новых деталей и сборочных единиц на замену изменяемым. В этом случае затраты, по нашим ожиданиям, возрастают намного более существенно, чем при обнаружении ошибки на этапах предварительного и детального проектирования.
- Эксплуатации, то в этом случае, в зависимости от масштабности ошибки, в самом худшем случае потребность в её устранении может привести к приостановке эксплуатации всего парка воздушных судов данной модификации. Приостановка эксплуатации означает крайне существенные убытки для авиакомпаний и эксплуатирующих организаций, особенно если контрактом на поставку предусмотрена компенсация издержек для эксплуатанта при приостановке эксплуатации по вине разработчика воздушного судна.

Таким образом, при моделировании необходимо рассмотреть 12 сценариев, каждый из которых характеризуется своим набором факторов, влияющих на стоимость перепроектирования и внесения изменений.

#### 5. Заключение

Целью исследования является создание научно-методического обеспечения для расчетов стоимости перепроектирования агрегатов или систем летательных аппаратов при обнаружении ошибок, допущенных при проектировании вследствие прочностных расчетов, не соответствующих требуемой точности. В данной работе проанализированы возможные сценарии обнаружения ошибок и объем

дальнейшей работы по внесению изменений в конструкцию с учетом различных этапов жизненного цикла. В дальнейшем будут построены математические модели, описывающие различные сценарии, позволяющие с достаточной степенью точности установить зависимость стоимости устранения ошибки от объема работ по устранению и текущей стадии жизненного цикла воздушного судна.

## Литература

1. *Погосян М.А.* Проектирование самолетов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Инновационное машиностроение. — 864 с.
2. *Сироткин О.С.* Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники / О.С. Сироткин, В.И. Гришин, В.Б. Литвинов. — М.: Машиностроение, 2006. — 331 с.
3. *Житомирский Г.И.* Конструкция самолетов. — М.: Машиностроение, 1995. — 415 с.
4. *Ендогур А.И.* Проектирование авиационных конструкций. Проектирование конструкций деталей и узлов. — М.: Изд-во МАИ, 2009. — 540 с.
5. *Титов Е. И.* К вопросу проектирования конструкции слабых звеньев навески основных опор шасси // Е. И. Титов, С. А. Серебрянский // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2023. — № 6(138).
6. *Титов Е.И., Серебрянский С.А.* Подход к проектированию конструкции типовых узлов навески основных опор шасси самолёта // Труды Шестнадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023)». Москва 26–28 сентября 2023 г. – Москва: ИПУ РАН, 2023 г. – С. 1100–1106.
7. *Титов Е. И., Серебрянский С.А.* Теоретическая модель методики проектирования узлов навески шасси с учётом уточнённого расчёта при проектировании срезных болтов // Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения: Тезисы 2-ой Международной конференции, Алушта, 29 августа – 03 2023 года. – Москва: Издательство "Перо", 2023. – С. 215-216.
8. *Ю.В. Киселёв, Д.Ю. Киселёв.* Шасси самолёта SuperJet: эл. учеб. Пособие – Эл. текстовые и граф. данные – Самара: изд. СГАО, 2014 – ISBN 978-5-7883-0856-2.
9. *Цифровые технологии в жизненном цикле российской конкурентоспособной авиационной техники / А. Г. Братухин, С. А. Серебрянский, Д. Ю. Стрелец [и др.].* – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. – 448 с. – ISBN 978-5-4316-0694-6. – EDN ZGQVGN.
10. *Apinut S.* Development of hybrid lifecycle cost estimating tool (HLCET) for manufacturing influenced design tradeoff // A Thesis Presented to The Academic Faculty – Aug 2012 – Georgia Institute of Technology.
11. *Bode, J.* Decision support with neural networks in the management of research and development: concepts and application to cost estimation // Information and Management – 5 August 1998 – Volume 34, Issue 1 – P. 33-40.
12. *Davide Di Pasquale, David Gore, Mark Savill, Timoleon Kipouros, Carren Holden.* Aircraft Cost Modelling, Integrated in a Multidisciplinary Design Context. // Engineering and Applied Sciences. - Vol. 4, No. 6, 2019 - P. 169-189.
13. *Mikhail Yu. Kuprikov, Lev N. Rabinskiy, Nikita M. Kuprikov.* Business objective for the life cycle of aircraft // INCAS BULLETIN – Vol. 11. Special Issue, 2019 – P.153-162.
14. *Roskam, J.* Airplane Cost Estimation: Design, Development, Manufacturing and Operating // Airplane Design: Part VIII – P.24-34.
15. *Michael Chun-Yung Niu.* Airframe structural design. // California: Lockheed Aeronautical Systems Company Burbank, 1988.