

ПРОБЛЕМЫ И КОНЦЕПЦИИ

УДК 624.45.001

А. С. ГИШВАРОВ**ОПТИМИЗАЦИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
АВИАЦИОННЫХ ГТД**

Рассматриваются основные методы решения задачи по оптимизации жизненного цикла авиационных ГТД: аналитический метод, статистическое моделирование и имитационное моделирование. Показано, что наиболее эффективным является имитационный метод. Приведены преимущества и недостатки данного метода. Рассмотрена задача оптимизации ресурсных испытаний ГТД с применением имитационного моделирования жизненного цикла ГТД. *Жизненный цикл ГТД; стоимость ГТД; оптимизация; имитационное, аналитическое, статистическое моделирование; ресурсные испытания*

**Гишваров
Анас Саидович**

профессор, зав. кафедрой авиационных двигателей. Дипл. инженер-механик по авиационным двигателям (УАИ, 1973). Доктор технических наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1993). Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан. Теоретические и экспериментальные исследования в области надежности, ресурса и испытаний технических систем.



Никогда не обижайтесь на свой жизненный цикл,
ведь никто не обещал вам, что он будет другим.

Э. Савур

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития мирового авиадвигателестроения характеризуется достижением высоких значений параметров рабочего процесса, обеспечивших существенное снижение удельного расхода топлива и удельной массы двигателей, по сравнению с двигателями предыдущих поколений. При этом значительно улучшились эксплуатационные характеристики двигателей — надёжность, ресурс, ремонтпригодность, эксплуатационная технологичность, а также их экологичность. Такие результаты стали возможны благодаря активному внедрению в двигателестроение достижений науки и техники последних десятилетий, включая работы по разработке методов и моделей прогнозирования технико-экономических показателей всех стадий жизненного цикла авиационных двигателей различных типов, размеров и назначений.

В свою очередь, создание высокоэффективных и качественных двигателей потребовало значительных ежегодных текущих затрат на НИОКР и единовременных капитальных вложений в основные средства производства. Несмотря на все усилия по сокращению сроков и стоимости разработки, а также внедрение новых технологических процессов в производство, создание базовых двигателей нового поколения обходится всё дороже. Так, например, на разработку двигателя V поколения F119 было затрачено более 4 млрд дол., не считая примерно 2 млрд дол., выделенных на разработку двигателя-конкурента F120. По сравнению с созданием базового двигателя IV поколения F100 стоимость разработки выросла в 2,5 раза, а по цене — более чем в 3 раза.

Одним из направлений снижения затрат на создание и эксплуатацию двигателей является комплексная оптимизация стоимости всего жизненного цикла (ЖЦ) на основе статистических и аналитических методов, а также методов имитационного моделирования.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Процесс разработки авиационного ГТД является достаточно неопределённым, и поэтому моделирование как самого процесса, так и его технико-экономических показателей представляет известные трудности.

Точность моделирования ЖЦ во многом зависит от точности моделирования его основных этапов: стоимости затрат на разработку, производство и эксплуатацию двигателя. В общем случае отдельные этапы ЖЦ могут моделироваться с применением статистических моделей [5]. Например, затраты на ОКР $C_{окр}$ и сроки их проведения $T_{окр}$ аппроксимируются статистическими моделями вида:

$$C_{окр} = a_0 G_{вн}^{a_1} (m + 1)^{a_2} \pi_{k_{\Sigma}}^{a_3} T_{\Gamma}^{a_4} K_{пр}^{a_5} T_3^{a_6}; \quad (1)$$

$$T_{окр} = b_0 G_{дв}^{b_1} T_{\Gamma}^{b_2} K_{пр}^{b_3} T_3^{b_4}; \quad (2)$$

где $G_{вн}$ — расход воздуха через внутренний контур двухконтурного двигателя (для одноконтурного — расход воздуха); m — степень двухконтурности (для одноконтурного двигателя $m = 0$); $\pi_{k_{\Sigma}}$ — суммарная степень повышения давления; T_{Γ} — температура газа перед турбиной; $G_{дв}$ — масса двигателя; $K_{пр}$ — коэффициент преэмергентности разработки; T_3 — год закладки (начала разработки); $a_1, \dots, a_6, b_1, \dots, b_4$ — статистические коэффициенты; a_0 и b_0 — статистические коэффициенты, зависящие от типа двигателя (ТРД, ТРДФ, ТРДД, ТРДДФ).

Такие же модели существуют и для турбовинтовых и турбовальных типов двигателей.

Наиболее распространенным методом моделирования динамики себестоимости производства C_M двигателей является построение так называемых «кривых освоения» («кривых обучения»), характерных для производства конкретного типа двигателя:

$$C_M = C_0 N^{-C_1}, \quad (3)$$

где C_0 и C_1 — статистические коэффициенты; N — порядковый номер выпускаемого двигателя.

Для среднеотраслевой динамики себестоимости производства двигателей $C_1 = 0,182$, т. е. с удвоением выпуска индивидуальная себестоимость двигателя снижается примерно на 12%. После получения среднеотраслевой зависимости снижения себестоимости от N появляется возможность исключить влияние этого фактора и моделировать уровень себестоимости в зависимости от других факторов. Для двигателей различной размерности модель себестоимости имеет вид

$$C_{N_0} = d_0 G_{вн}^{d_1} \pi_{k_{\Sigma}}^{d_2} (m + 1)^{d_3} T_{\Gamma}^{d_4} \bar{R}_{\Phi}^{d_5} T_{нс}^{d_6}; \quad (4)$$

где C_{N_0} — себестоимость производства двигателя при фиксированном значении выпуска $N = N_0$ (при моделировании выбор базового значения N_0 не играет особой роли и может быть любым в области серийно освоенных выпусков $100 \leq T_0 \leq 500$); \bar{R}_{Φ} — степень форсирования двигателя (для ТРДФ и ТРДДФ); $T_{нс}$ — год начала серийного производства; d_1, d_2, \dots, d_6 — статистические коэффициенты; d_0 — коэффициент, зависящий от типа двигателя (ТРД, ТРДФ, ТРДД, ТРДДФ).

Зависимость последнего коэффициента от типа двигателя получена с использованием «фиктивных» переменных, а коэффициенты d_1, d_2, \dots, d_6 являются усредненными статистическими оценками для двигателей указанных типов. Аналогичные модели разработаны для турбовинтовых и турбовальных ГТД.

В условиях крайне сложного положения для отечественного двигателестроения последнего десятилетия прогнозирование стоимостных показателей процессов разработки и производства двигателей с применением статистических моделей стало практически невозможным. Из всех перечисленных статистических моделей только модели цен на двигатели в условиях мирового рынка (ввиду его достаточной стабильности) могут использоваться для прогнозирования.

Единственно возможным в этот период является использование аналого-сопоставительных методов и методов прямого счета, которые плохо формализуются и во многом имеют субъективный характер.

Для сравнительной оценки влияния на эксплуатационные затраты ресурса и уровня безотказности ГТД на этапе проектирования двигателя, когда сведения о многих особенностях, характеризующих эксплуатацию двигателя, не известны или приблизительны, весьма эффективным является применение аналитических методов [5]. Несмотря на простоту счета и приближенность, они позволяют учитывать влияние основных факторов на объем выпуска и число ремонтов двигателей.

Разработка аналитических моделей предполагает ряд допущений, среди которых наиболее существенными являются следующие:

- ввод в эксплуатацию и списание планеров происходит равномерно;
- к началу списания самолетов процесс эксплуатации парка двигателей становится стационарным и сохраняется таким до конца;
- интенсивность выпуска двигателей такова, что отношение числа запасных двигателей к числу двигателей, установленных на самолеты, поддерживается постоянным на потребном уровне до момента прекращения выпуска двигателей;
- время пребывания двигателя в обороте не зависит от величины оборотного фонда;
- флуктуация потока досрочных съемов двигателей является относительно малой.

2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВИАЦИОННЫХ ГТД

Когда применение аналитических моделей дает слишком приближенные результаты, затруднено или вообще невозможно, то наиболее эффективными в таких случаях являются методы прогнозирования потребности в двигателях, основанные на моделировании на ЭВМ процессов эксплуатации и воспроизводства парков летательных аппаратов и двигателей с помощью имитационных моделей.

Являясь мощным инструментом исследования и оптимизации технических систем в авиации и двигателестроении, имитационное моделирование успешно используется как при проектировании двигателей, так и при моделировании испытаний агрегатов, диагностировании состояния двигателей, обосновании стратегии эксплуатации, решении организационных вопросов по поставке и прогнозированию потребностей и др. [1–6, 10, 11].

В отличие от статистических моделей имитационные модели процесса разработки двигателя, в принципе, могут использоваться для прогнозирования в новых экономических условиях, так как они инвариантны по отношению к макроэкономическим изменениям. Позволяя получать оценки только натуральных показателей (продолжительность разработки, число требуемых опытных образцов, необходимый объем испытаний, загрузка стендов и т. д.), эта модель требует для расчета стоимостных показателей использовать прогнозные значения стоимости часа испытаний, заработной платы персонала, уровня накладных расходов в ОКБ и других показателей, зависящих от макроэкономики.

В отечественном авиадвигателестроении имитационное моделирование применялось в 70–80-е годы для решения задач по согласованию плана создания двигателей с возможностями ОКБ. При этом имитационное моделирование процесса функционирования двигательных ОКБ рассматривалось как моделирование системы массового обслуживания и собственно процесса доводки авиационных ГТД. Верификация последней модели проводилась по фактическим данным разработки двигателя АЛ-31Ф, после чего модель использовалась при планировании разработки перспективного двигателя V поколения.

Разработка имитационной модели предполагает решение следующих задач:

- идентификации процессов в системе эксплуатации летательных аппаратов (ЛА) и авиационных двигателей (АД), анализ элементов, включенных в эти процессы, их структур и взаимосвязей;
- построения математической модели исследуемого процесса;
- реализации разработанной модели на ЭВМ.

При этом разработка самой модели базируется на принципах: системного подхода; обеспечения необходимого разнообразия модели (т. е. обеспечения того, чтобы полнота воспроиз-

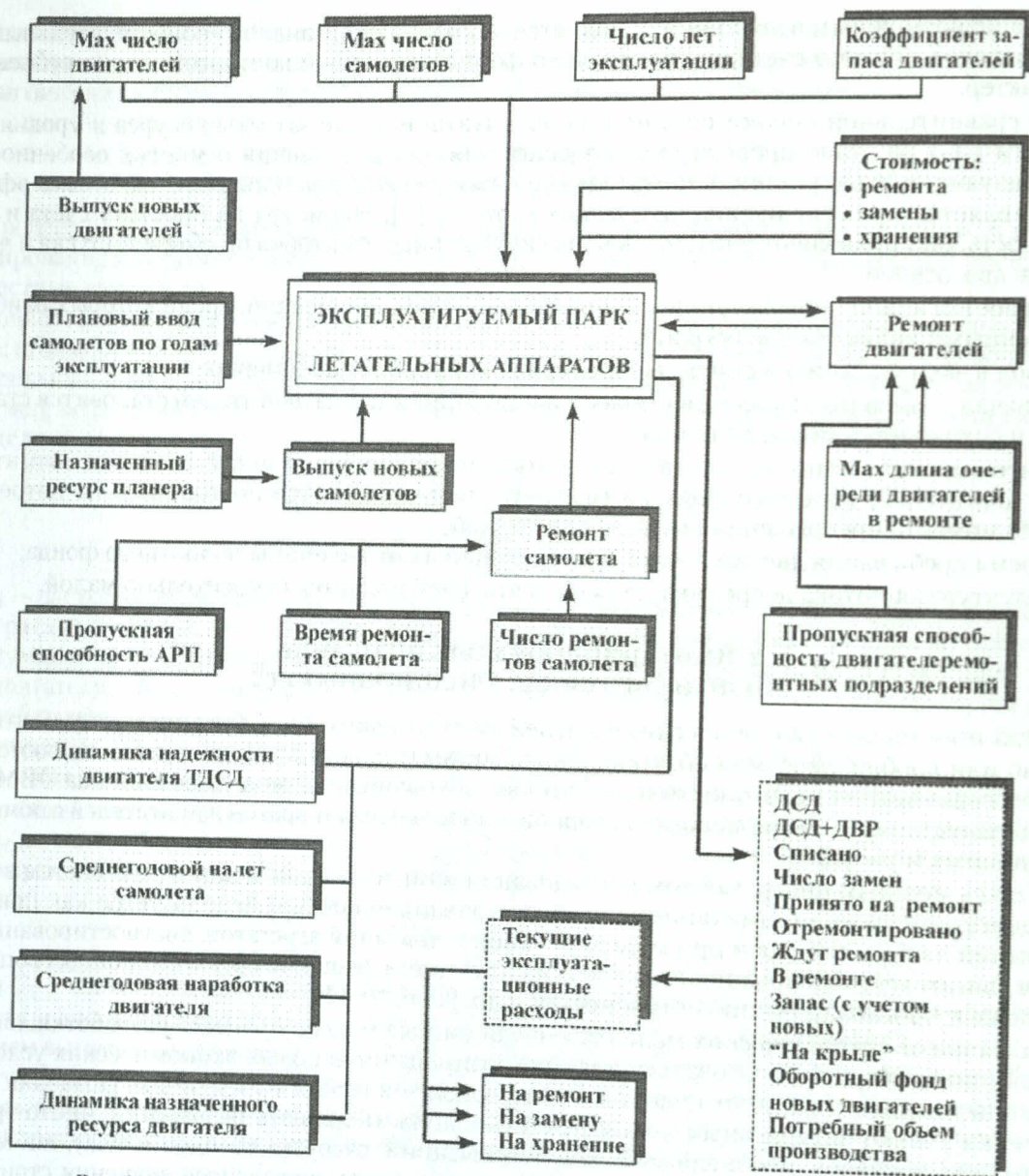


Рис. 1. Имитационная модель оценки параметров жизненного цикла парка ЛА:
 ДСД – досрочный сьем двигателя; Т – наработка; ТДСД – наработка на ДСД

ведения системы в модели соответствовала требованиям, вытекающим из цели исследования); декомпозиции системы на отдельные подсистемы вплоть до уровня элементов; отслеживания «жизни» каждого элемента системы.

Важнейшей стадией жизненного цикла является эксплуатация двигателей, поскольку служит побудительным мотивом и целью разработки и производства авиационных ГТД. Именно на этапе эксплуатации проявляется совершенство двигателя и эффективность работ по достижению его эксплуатационно-технических характеристик. Результаты эксплуатации служат индикатором оправданности затрат, произведенных на предыдущих этапах.

Наибольшую неопределенность и трудность при оценке представляют затраты на приобретение новых двигателей и узлов и затраты на ремонт и техобслуживание.

В имитационных моделях процесс эксплуатации парка ГТД представляет собой последовательную во времени смену состояний объектов эксплуатации (самолет, двигатель, модуль) в соответствии с принятой стратегией управления (технического обслуживания, ремонта и др.). Основными состояниями процесса эксплуатации самолетов и двигателей являются: использование по назначению (полеты), транспортирование, хранение, техническое обслуживание и ре-

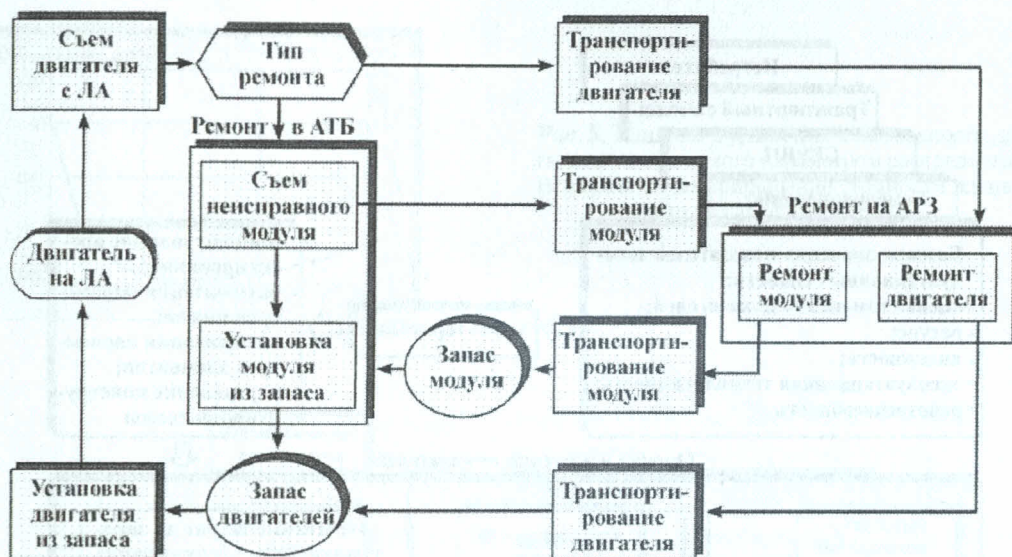


Рис. 2. Схема движения двигателей, снятых со списываемых самолетов

монт, ожидание поступления в каждое состояние, т. е. процесс эксплуатации парка ЛА и АД представляется при имитационном моделировании как функционирование системы, состоящей из взаимосвязанных подсистем.

Формирование парка ЛА, находящихся в эксплуатации, проводится по схеме, приведенной на рис. 1 [1, 2]. При этом пригодность ЛА к эксплуатации определяется состоянием планера ЛА:

- ЛА считается годным и продолжает оставаться в эксплуатации, если ресурс планера до ремонта не выработан;
- ЛА выбывает из эксплуатации на время ремонта планера, если ресурс до ремонта выработан;
- ЛА списывается и в дальнейшем не учитывается, если выработан назначенный ресурс планера (двигатели, снятые с таких ЛА, направляют в эксплуатацию в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2).

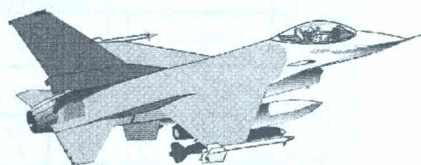
Отдельной задачей при имитационном моделировании является моделирование отказов. При этом возможно использование двух подходов к моделированию отказов, основанных:

- на концепции двойственности природы отказов — износных и внезапных;
- на использовании статистических данных о средней наработке двигателей на один досрочный съем по всем причинам.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ГТД

Имитационное моделирование процесса эксплуатации авиационных двигателей позволяет решать различные задачи исследовательского и прикладного характера:

- обоснование рациональных значений ресурса и показателей безотказности двигателей и модулей;
- разработка оптимальных стратегий замен двигателей, узлов и деталей;
- определение программ их производства и ремонта;
- оценка целесообразности увеличения ресурса и календарного срока службы ГТД;
- оценка влияния условий эксплуатации на показатели готовности парка ЛА и др.



В качестве примера на рис. 3 приведена структурная схема исследования влияния эксплуатационных свойств двигателя на стоимость жизненного цикла [12]. Было установлено, что оптимальное значение ресурса горячей части двигателя перспективного истребителя, соответствующее максимальному значению критерия «стоимость-эффективность», составляет 50% ресур-

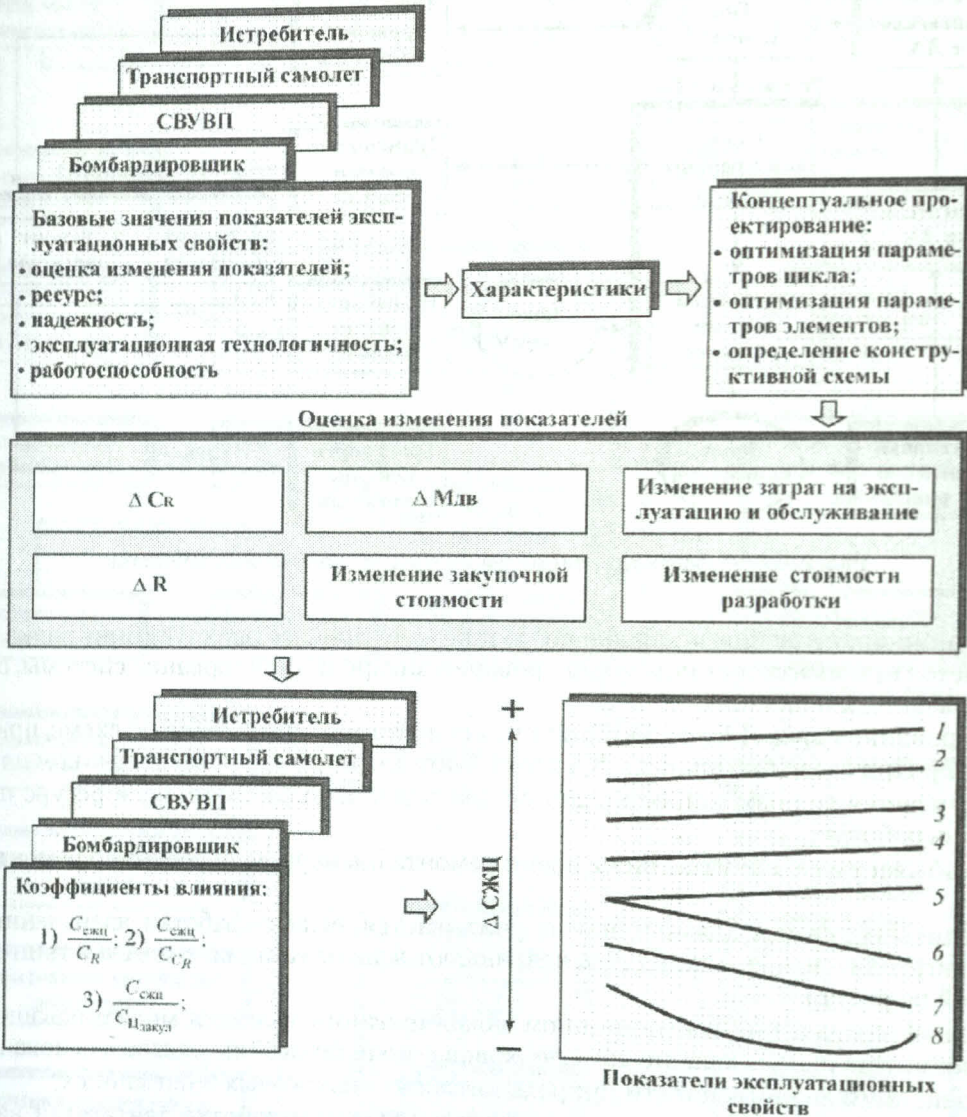


Рис. 3. Структурная схема исследования влияния эксплуатационных свойств силовой установки на стоимость жизненного цикла (СЖЦ): 1 – удельный расход топлива; 2 – масса двигателя; 3 – цена; 4 – стоимость разработки; 5 – напряжения в конструкции; 6 – тяга двигателя; 7 – затраты на эксплуатацию и обслуживание; 8 – СЖЦ

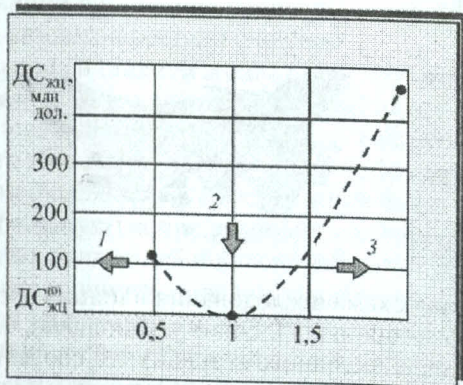


Рис. 4. Влияние ресурса холодной части двигателя на СЖЦ: 1 – зона с преобладающим влиянием стоимости обслуживания; 2 – оптимальное значение по критерию «стоимость-эффективность»; 3 – зона, где превагирует влияние ухудшения характеристик двигателя; 4 – базовое значение

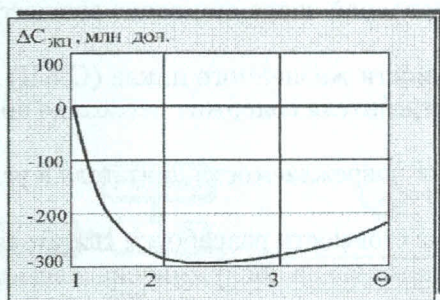


Рис. 5. Влияние повышения долговечности двигателя, оцениваемого параметром распределения Вейбулла Θ , на приращение стоимости жизненного цикла двигателя $\Delta C_{жц}$

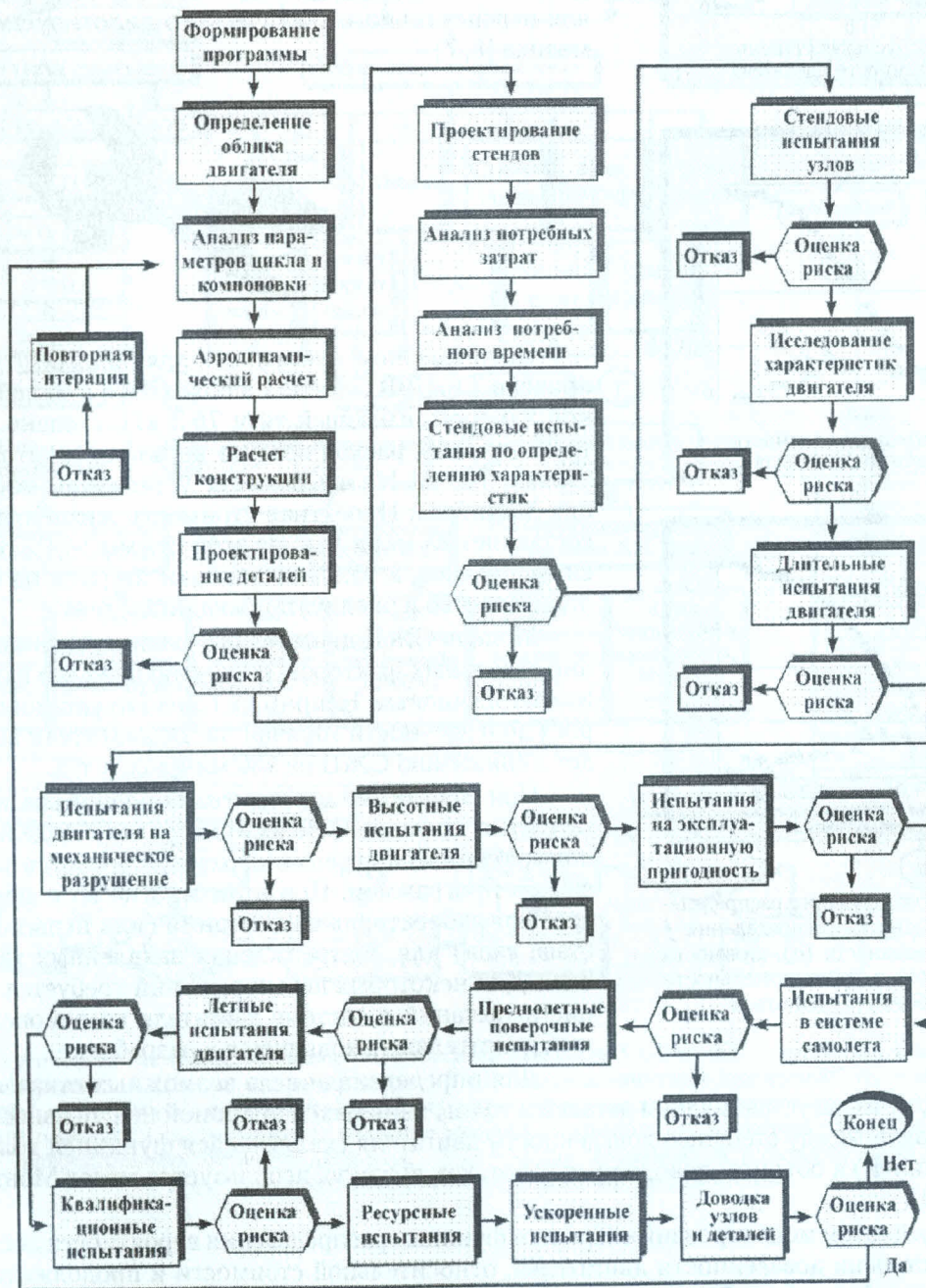
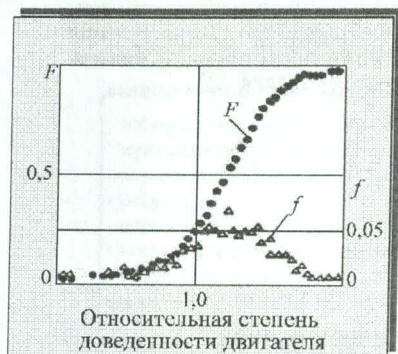
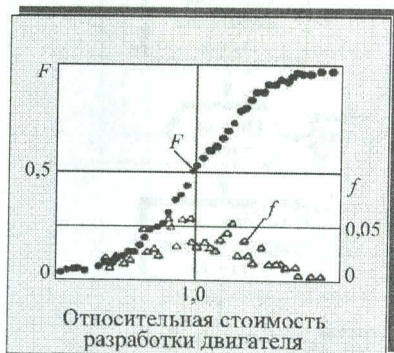


Рис. 6. Блок-схема имитационного моделирования отказов при разработке двигателя

са планера самолета, а оптимальное значение ресурса холодной части двигателя соответствует полному ресурсу планера (рис. 4).



а



б



в

Рис. 7. Прогноз функции распределения F и плотности распределения f степени доведенности (а), стоимости разработки (б) и продолжительности разработки (в) двигателя

Модель стоимости жизненного цикла (СЖЦ) силовой установки истребителя содержит несколько подпрограмм:

- определения повреждаемости двигателя в условиях эксплуатации;
- определения стоимости разработки двигателя;
- определения затрат на обслуживание и эксплуатацию.

Другим примером эффективного применения имитационного моделирования является выбор двигателя для перспективного тактического пилотируемого штурмовика [6, 7].



Оптимальным двигателем для такого штурмовика признан ТРДДФ General Electric GE16 с общей форсажной камерой, имеющей тягу 76,3 кН, степень двухконтурности 0,46, расход воздуха через вентилятор 63 кг/с и массу 730 кг. На штурмовике устанавливаются два таких двигателя. Проектная стоимость жизненного цикла составляет 25 млрд дол. Из этой суммы 14,1% приходится на топливо, а 15,1% составляют затраты на создание, производство и эксплуатацию двигателей.

Модель СЖЦ двигателя позволяет оценивать влияние отдельных факторов, определяющих его надежность и долговечность. Например (рис. 5), установлено, что рост долговечности горячей части двигателя на 20% ведет к снижению СЖЦ на 150 млн дол. и т. д.

При разработке долгосрочных планов создания двигателей с применением имитационного моделирования новые технические решения разрабатываются по независимым программам. При этом многие из нововведений требуют лабораторных испытаний (или испытаний в составе узла) для подтверждения заявленных характеристик. Для некоторых новых решений требуется проведение испытаний в системе двигателя на демонстрационных двигателях, находящихся в разработке.

Для определения числа возможных отказов и неисправностей, методов установления деталей и узлов, явившихся причиной неисправности, а также взаимосвязи между степенью доведенности двигателя (являющейся функцией долговечности всех деталей) и объемом доводочных работ, как правило, используется метод Монте-Карло (рис. 6) [8, 9].

По результатам моделирования строятся функции распределения вероятности достижения различной степени доведенности двигателей, относительной стоимости и продолжительности программ разработки (рис. 7).

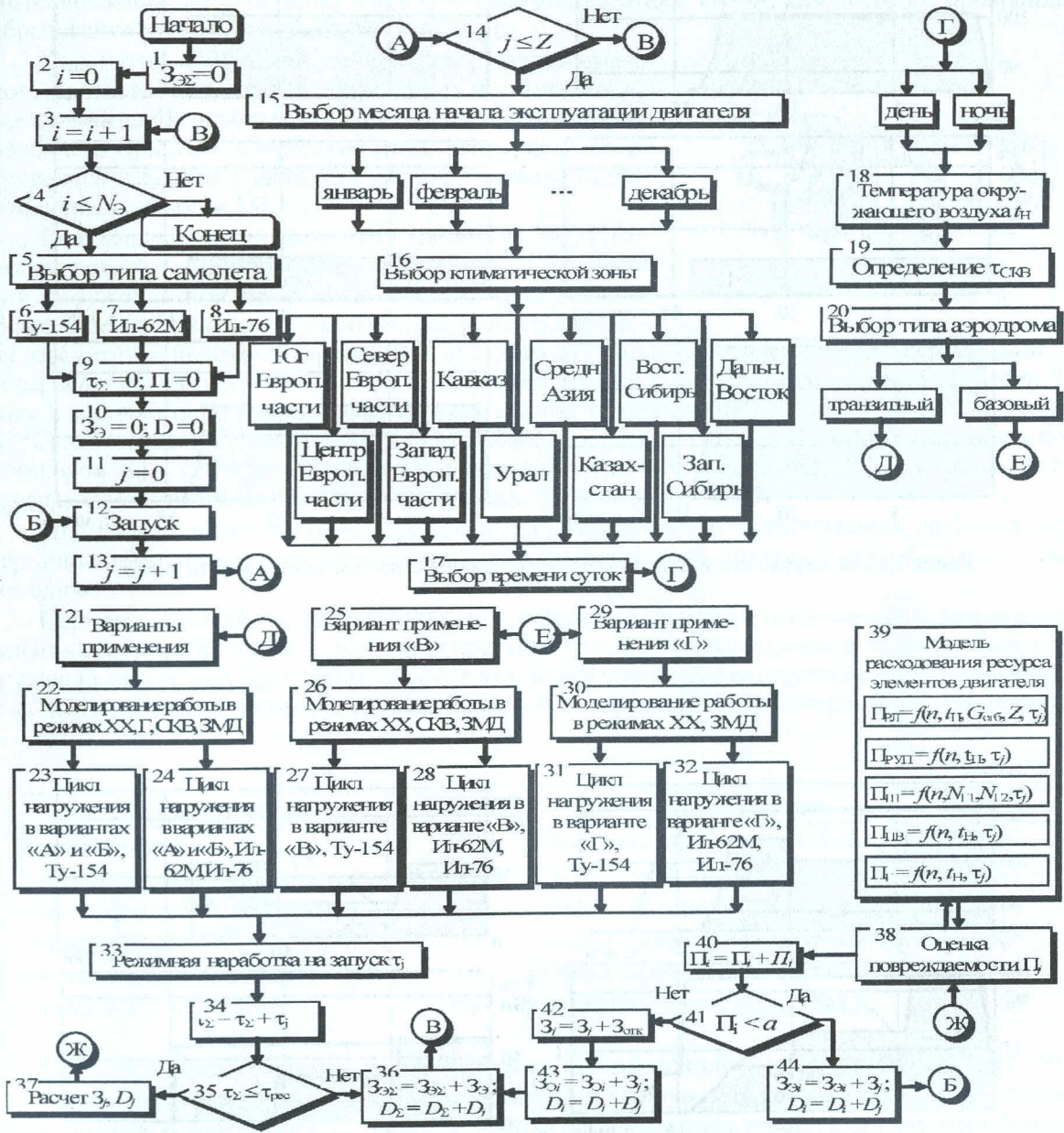


Рис. 8. Укрупненная схема моделирования эксплуатации двигателя ТА-6А: XX — «холостой ход»; Г — генераторный режим; СКВ — кондиционирование; ЗМД — запуск маршевых двигателей; N_0 — объем парка двигателей; $\tau_{рес}$ — ресурс двигателя по наработке; Z — ресурс двигателя по запускам; t_H — температура окружающего воздуха; $\tau_{СКВ}$ — наработка в режиме кондиционирования; τ_{Σ} — суммарная наработка двигателя; Π_j — повреждаемость элементов двигателя; Z_{Σ} — общие затраты на эксплуатацию парка двигателей; D_{Σ} — суммарный доход от эксплуатации партии двигателей

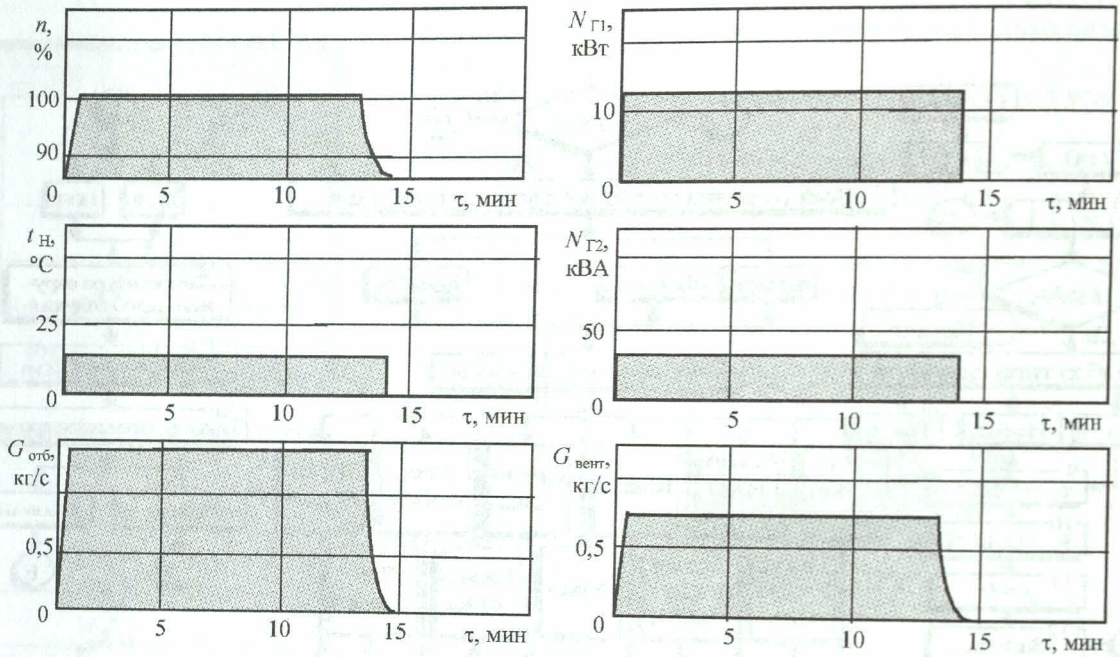


Рис. 9. Циклы нагружения двигателя в серийных эквивалентно-циклических испытаниях

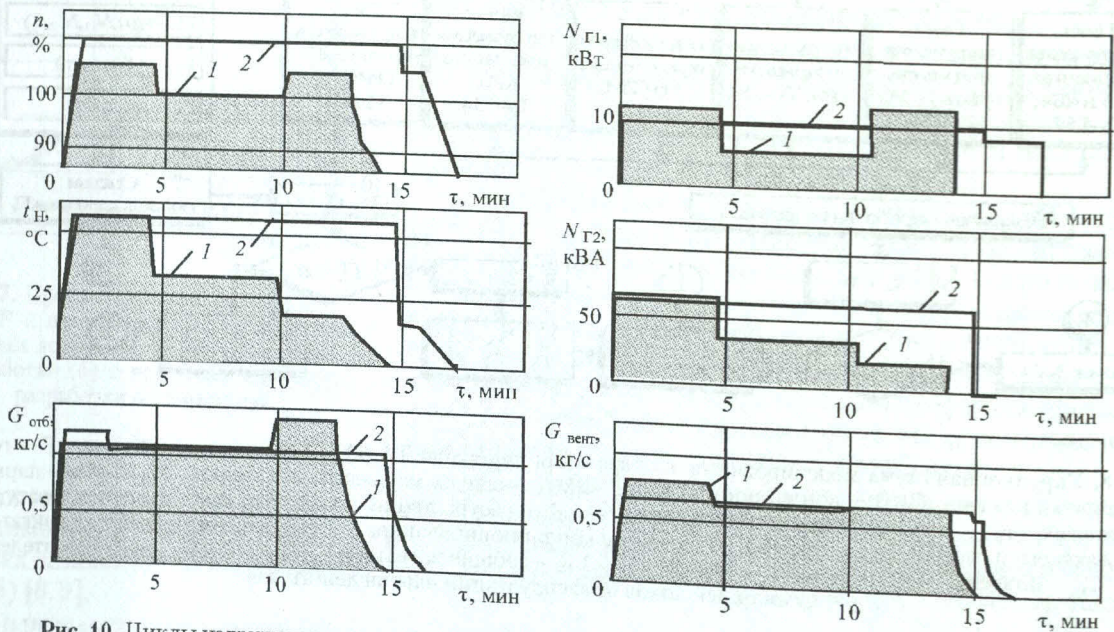
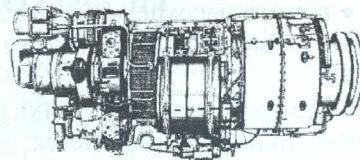


Рис. 10. Циклы нагружения двигателя в опытных ресурсных испытаниях: 1 – при $\overline{\delta\Pi_{оп}} = \overline{\delta\Pi_{сер}}$; 2 – при $t_{и.оп} = t_{и.сер}$

4. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ В СИСТЕМЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ГТД

Помимо вышеперечисленных задач имитационное моделирование позволяет также решать и более частные задачи, например, проводить выбор параметров ресурсных испытаний авиационных ГТД в системе ЖЦ [3]. В качестве примера на рис. 8 приведена укрупненная схема моделирования эксплуатации вспомогательного двигателя ТА-6А, для которого проводилось обоснование программ испытаний.

Параметры испытаний выбирались с учетом конечного прогнозного значения эффекта от серийно выпускаемого изделия, определяемого имитационным моделированием. При этом в процессе моделирования рассматривались различные варианты оценки эксплуатационной повреждаемости [3].



Повреждаемость «критичных» элементов двигателя моделировалась с учетом качества изготовления, условий нагружения двигателя в испытаниях и эксплуатации. В качестве «критичных» элементов для данного двигателя рассматривались: рабочая лопатки 1-й ступени турбины; радиально-упорный подшипник ротора; ведущая шестерня редуктора; подшипник вентилятора; генератор переменного тока. Режим и условия нагружения двигателя задавались: температурой воздуха на входе в двигатель $t_{в}, ^\circ\text{C}$; относительной частотой вращения ротора $n, \%$; количеством воздуха, отбираемого за компрессором $G_{отб}, \text{кг/с}$; расходом охлаждающего воздуха через вентилятор $G_{вент}, \text{кг/с}$; нагрузкой генераторов переменного и постоянного токов $N_{Г1}$ и $N_{Г2}, \text{кВА}$ и кВт .

Испытания, разработанные с применением имитационного моделирования, сравнивались с серийной программой эквивалентно-циклических испытаний, сформированной по отраслевой методике.

Серийная программа эквивалентно-циклических испытаний предназначена для подтверждения ресурса 2000 часов и 3000 запусков. При этом испытываются два двигателя. Циклы нагружения двигателей приведены на рис. 9. Оптимальные циклы нагружения двигателей в опытных ресурсных испытаниях приведены на рис. 10, а характеристика программы — в таблице.

Таблица

Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Количество циклов	7500	Режимная наработка за 1 этап, ч	5
Длительность цикла, мин	21	Общая наработка за 1 этап, ч	6,5
Режимная наработка за 1 цикл, мин	10	Количество этапов	120
Общая наработка за 1 цикл, мин ...	13	Режимная наработка за испытания, ч	606
Количество циклов в этапе	30	Общая наработка за испытания, ч ...	786
Длительность этапа, мин	630	Суммарное время испытаний, ч	1266

Сравнение эффективности программ испытаний проводилось для двух случаев (рис. 10):

- при одинаковом значении предельно допустимой «невязки» по повреждаемости «критичных» элементов двигателя $\delta\Pi_{он} = \delta\Pi_{сер} = 20\%$; эффективность оценивалась по длительности испытаний;

- при одинаковой длительности испытаний ($\tau_{ион} = \tau_{исер}$); эффективность оценивалась по значению «невязки» по повреждаемости «критичных» элементов двигателя.

Применение имитационного моделирования в данном случае позволило (при прочих равных условиях) повысить уровень эквивалентности испытаний в 1,7 раза и сократить длительность испытаний в 1,2 раза по сравнению с испытаниями по серийной программе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ состояния проблемы оптимизации жизненного цикла авиационных ГТД показывает, что, имитационное моделирование является эффективным методом, позволяющим решать широкий круг задач, включая:

- оценку стоимости жизненного цикла;

- обоснование стратегии эксплуатации;
- обеспечение безопасной эксплуатации;
- решение организационных вопросов по поставке и прогнозированию потребностей и др.

С другой стороны, необходимо отметить, что, наряду с преимуществами перед другими видами моделирования, имитационное моделирование имеет недостатки, основными из которых являются:

- проблемы с проверкой адекватности моделей;
- сложность организации и высокая стоимость имитационных экспериментов;
- весьма высокие, часто трудновыполнимые требования к информационному обеспечению модели (чем подробнее и точнее модель, тем труднее получить для нее необходимую информацию).

Очевидно, что на практике наиболее гибкой стратегией исследования и оптимизации жизненного цикла ГТД является сочетание различных видов моделирования, обусловленное, в основном, объемом и качеством располагаемой информации об исследуемом объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никонова И. А., Шепель В. Т.** Технико-экономическая эффективность авиационных ГТД в эксплуатации. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.
2. **Смирнов Н. Н., Ицкович А. А.** Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. М.: Транспорт, 1980. 184 с.
3. **Гишваров А. С.** Оптимизация ресурсных испытаний технических систем имитационным моделированием в системе жизненного цикла. Уфа: Гилем, 2003. 328 с.
4. **Гишваров А. С.** Совмещенные ресурсные испытания технических систем. Уфа: Гилем, 2001. 258 с.
5. **Ждановский А. В., Иджиян Г. Г., Булыгина М. М. и др.** Прогнозирование затрат на разработку, производство и эксплуатацию авиационных ГТД // Научный вклад в создание авиационных двигателей: М: Машиностроение, 2000. С. 624–649.
6. **Методология проектирования двигателей, эффективных с точки зрения стоимости жизненного цикла системы** // Новости зарубежной науки и техники. 1984. № 4. С. 1–7.
7. **Willis S. W.** A methodology for planning a cost effective engine development // AIAA-82-1140.
8. **Моделирование процесса разработки двигателя методом Монте-Карло** // Новости зарубежной науки и техники. 1985. № 8. С. 4–11.
9. **Culy D. G., Gossen J. J.** Monte-Carlo simulation of the engine development process // J. Aircraft. 1984. V. 21, No 7. P. 462–468.
10. **Гатушкин А. А., Кременецкий Н. М., Цуриков О. Н.** Некоторые вопросы оптимизации системы диагностирования ГТД с использованием модели процесса эксплуатации парка двигателей // Методы диагностирования авиационной техники. К.: КИИГА, 1989. С. 17–20.
11. **Выбор основных эксплуатационных показателей перспективных силовых установок на этапе проектирования на основе анализа стоимости жизненного цикла системы** // Новости зарубежной науки и техники. 1984. № 2. С. 12–18.
12. **Warwick T.** Setting design goals for advanced propulsion systems // J. Aircraft. 1983. V. 20, No 3. P. 203–209.