

Прогнозирование эффективности модернизации транспортных космических комплексов с применением экспертной системы

В.И. Зернов, А.П. Парамонов

В статье рассматриваются вопросы прогнозирования эффективности модернизации ракетно-космической техники, связанные с оценкой экономических и технических показателей качества разработки. Приводятся результаты исследований, связанных с анализом опыта применения экспертной системы в процессе поиска технических решений, обеспечивающих максимальную рентабельность проекта модернизации комплекса. Подтверждается эффективность метода поиска рациональных решений при исследовании модификации ракеты-носителя с использованием экспертной системы, позволяющего оценить рентабельность проекта модернизации ракетно-космического комплекса на начальных этапах проектной разработки.

Модернизация ракетно-космического комплекса, модификация ракеты-носителя, экспертная система, критерии эффективности, рациональные проектные решения, оценка эффективности, рентабельность проекта, сравнительный анализ, альтернативные варианты, принятие решения.

Modernization of a space-rocket complex, updating of a booster rocket, expert system, criteria of efficiency, rational design decisions, estimation of efficiency, profitability of the project, the comparative analysis, alternative variants, decision-making.

Модернизация транспортных космических систем является важной научной задачей, связанной со снижением стоимости реализации программ выведения на орбиту и продления срока службы существующих носителей. Более того, улучшение технических и экономических характеристик ракет-носителей позволяет расширить диапазон выведения полезного груза при осуществлении транспортных космических операций на базе имеющихся в эксплуатации ракетно-космических систем.

При принятии решения о модернизации ракетно-космического комплекса (РКК) возникает необходимость проведения исследований, связанных с оценкой повышения эффективности системы в результате модернизации. Целью исследовательских работ является определение перспективных технических решений, позволяющих получить необходимое снижение суммарных затрат на реализацию программы выведения в результате модернизации РКК. Трудоемкость процесса поиска рациональных решений диктует необходимость разработки методов поиска и принятия проектных решений с применением современных информационных технологий,

призванных оказать положительное влияние на сокращение времени проектирования и повышения качества проектных работ, что имеет принципиальное значение в условиях ограниченного финансирования.

Одним из наиболее динамично и эффективно развивающихся направлений современной информатики являются экспертные системы, способные осуществлять автоматический поиск решений проблемы в конкретной предметной области, используя экспертную оценку специалистов, формально представленную в рамках компьютерной программы. Эффективность экспертных систем доказана опытом их успешного применения в различных областях науки и производства. В настоящее время подобные системы применяются практически во всех сферах человеческой деятельности, за исключением проектной разработки РКК.

Таким образом, современное развитие информационных технологий и опыт применения автоматизированных систем проектирования летательных аппаратов определяют актуальность разработки специализированной экспертной системы, формирующей варианты перспективных направлений улучшения характеристик транспортных космических комплексов, и методической основы ее применения. Использование подобной системы на ранних этапах поиска решений, связанных с определением элементов для модификации в составе комплекса, способно оказать положительное влияние на результативность процесса формирования перспективных направлений модернизации РКК, обещающих максимум эффективности.

Учитывая актуальность подключения специализированных экспертных систем к процессу проектирования ракетно-космической техники, определяются задачи исследования, связанные с разработкой методики поиска технических решений в процессе модернизации РКК с помощью экспертной системы и оценкой эффективности применения такого подхода при решении задачи снижения стоимости транспортной космической операции и расширения диапазона применения существующих носителей.

При решении задачи модернизации системы РКК в качестве предметной области исследования рассматривается комплекс вопросов, связанных с модификацией ракеты-носителя и доработкой наземного комплекса. Под модификацией носителя понимается улучшение характеристик летательного аппарата за счет доработки отдельных элементов его конструкции. В общем случае разработка модификации носителя является многокритериальной проектной задачей, которая связана с определением параметров объекта, определяющих максимальную рентабельность проекта модернизации РКК при выполнении требований по целевой эффективности реализации проекта.

Определение эффективности проектных решений связано с оценкой показателей качества разработки в процессе модификации носителя. Выделяются четыре группы показателей качества разработки (критериев выбора решения) [5]:

- показатели функционального качества (функциональной эффективности) разработки системы летательного аппарата;
- экономические показатели разработки, связанные с затратами при реализации проекта модификации носителя и модернизации РКК;
- показатели трудоемкости работ (затрат времени на работы при определенной технологии);
- производительность реализуемой техники.

Выбираемыми (варьируемыми) параметрами – так называемыми параметрами управления при поиске технического решения являются [5]:

- параметры создаваемой системы;
- параметры технологии реализации проекта;
- функция, определяющая процесс создания и обеспечения надежности;
- закон управления функционированием системы;
- функция управления продвижением проекта.

Таким образом, основная проектная задача может при поиске технических решений в процессе разработки модификации носителя и модернизации РКК может быть сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned}
 C_{\Sigma}(P^M, t_p) \rightarrow \min_{P^M \in G}; & & P^M(P^M, P_i^M) = P^{зад}; & & t_{np} \leq t_{np}^{зад}; \\
 m_{nn}^M = m_{nn}^{\bar{}} + \Delta m_{nn}, \Delta m_{nn} > 0; & & P^{\bar{}} = P^{зад}; & & N = N^{зад}; \\
 H_{orb}^M = H_{orb}^{зад}; & & E^M \leq E^{зад}; & & T = T^{зад};
 \end{aligned} \tag{1}$$

где: $C_{\Sigma}(\cdot)$ – суммарные затраты на модификацию носителя и доработку наземного комплекса с учетом эксплуатации РКК при обеспечении N запусков в год в течение T лет;

$m_{nn}^{\bar{}}$, m_{nn}^M – масса полезного груза, выводимая на орбиту соответственно базовой ракетой-носителем (РН) и модификацией РН;

H_{orb}^M – высота орбиты модифицированной РН;

$P^{\bar{}}$ – вектор основных проектных параметров базовой РН;

P^M – вектор основных проектных параметров модификации РН;

$P^M(\cdot)$ – функция обеспечения надежности модификации РН;

P_i^M – функция обеспечения надежности подсистем модификации РН;

E^M – соответствие модификации РН экологическим нормам эксплуатации РКК;

t_p – время реализации проекта модернизации РКК;

G – область возможных решений.

$$m_{nn}^M = m_{nn}^{\bar{}} + \Delta m_{nn}, \Delta m_{nn} > 0;$$

Решение многокритериальной задачи проектирования летательных аппаратов в общем случае сводится к векторной оптимизации [2], т.е. к нахождению таких проектных параметров Π_1 , характеризующих существование носителя, и параметров Π_2 состояний (функционирования), при которых обеспечивается в определенном смысле близость получаемых показателей качества к их экстремальным значениям:

$$K_{opt}^i = \underset{\{\Pi_1, \Pi_2\}}{extr} K^i(\Pi_1, \Pi_2), \quad i = \overline{1, n}; \quad (2)$$

Существующие методы и алгоритмы решения многокритериальной задачи проектирования [2] в основном предусматривают поиск технических решений путем свертки, т.е. сведения задачи многокритериальной оптимизации к оптимизации однокритериальной, нахождения множества неуправляемых значений показателей качества, оптимизации иерархической последовательности набора критериев, описывающих свою подсистему РН или состояние в определенные моменты функционирования системы.

Стоит отметить, что общим моментом при решении задач проектирования является то, что одним из основных показателей эффективности является экономический показатель, поэтому существуют предпосылки к сведению многокритериальной задачи к задаче однокритериальной с единственным экономическим показателем. Однако при таком подходе происходит обобщение позиций анализа (расширение пространства анализа и размера вектора параметров управления), задача поиска рационального проектного решения теряет смысл [5].

Учитывая особенности поиска технических решений при проектировании ракетно-космической техники, рассмотрим проблему поиска рациональных проектных решений при модернизации РКК с применением экспертной системы. Основные принципы работы экспертной системы, порядок логических рассуждений, реализуемый в рамках системы, и методы решения задачи определения достоверных исходов в процессе работы экспертной системы подробно описаны в литературе [3]. Существующие подходы к решению задачи поиска технических решений при проектировании, успешно реализованные в рамках специализированных экспертных систем позволяют разработать алгоритм выбора рациональных проектных решений в процессе модификации РН с применением экспертной системы.

Сформулируем основные функции экспертной системы, используемой в процессе исследования модификации РН:

1) генерирование технически возможных вариантов проектных решений, обещающих улучшение экономических и технических характеристик базового носителя при выбранном составе замены подсистем:

$$L_i = \{\Pi^m : K_i(\Pi^m) \geq K_i(\Pi^o)\}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (3)$$

$$L_i \in G;$$

где: L_i - технически возможные варианты проектных решений, $i = \overline{1, n}$;
 $K_i(\Pi^m)$ - набор критериев качества модификации РН, $i = \overline{1, n}$;
 K_1 - снижение суммарных затрат на реализацию программы выведения;
 K_2 - увеличение массовой отдачи РН;
 K_3 - обеспечение заданного уровня надежности РН;
 K_4 - экологическая безопасность.
 K_5 - время реализации проекта модификации РН и модернизации РКК.

2) Промежуточная оценка влияния изменений в составе системы РН на характеристики РКК и характеристики подсистем носителя;

3) Формирование конкурентоспособных технических решений, удовлетворяющих заданным требованиям (2), и представляемых экспертной системой в качестве рекомендуемых решений:

$$F_i = \{ \Pi^m : K_i(\Pi^m) \rightarrow \text{extr} \}, \quad i = \overline{1, n} ;$$

$$F_i \subset L ;$$
(4)

Учитывая особенности решения основной задачи проектирования (1), разработан и предложен алгоритм поиска рациональных технических решений в процессе исследования модификации РН и модернизации РКК. Данный алгоритм предусматривает использование экспертной системы для формирования на начальном этапе поиска перспективных направлений улучшения характеристик РКК в процессе модернизации. Экспертная система осуществляет поиск конкурентоспособных вариантов модификации РН с учетом доработки наземного комплекса и представляет их в рамках рекомендаций. Данный этап алгоритма реализуется в автоматическом режиме (рис.1).

Следующий этап алгоритма связан с оценкой показателей качества вариантов модификации РН. Расчет улучшения показателей качества носителя, ожидаемый в результате модификации, а также рентабельность проекта модернизации РКК в целом производится в полуавтоматическом режиме, и предусматривает использование апробированных математических моделей, обеспечивающих заданную точность расчетов. Сравнительный анализ полученных результатов позволяет выделить рациональные проектные решения.

Заключительный этап алгоритма, связанный с принятием проектного решения, обещающего максимум эффективности, носит исключительно творческий характер. В случае, если ни одно из рассмотренных ранее проектных решений не удовлетворит заданным требованиям, необходимо провести поиск альтернативных вариантов модернизации РКК.

Для исследования эффективности предложенного метода принятия проектного решения при поиске вариантов модернизации РКК разработана базовая экспертная система, обеспечивающая выполнение требований (3), (4). Программа содержит блок экспертных оценок, связанных с поиском технических решений в процессе исследования направлений модификации носителя.

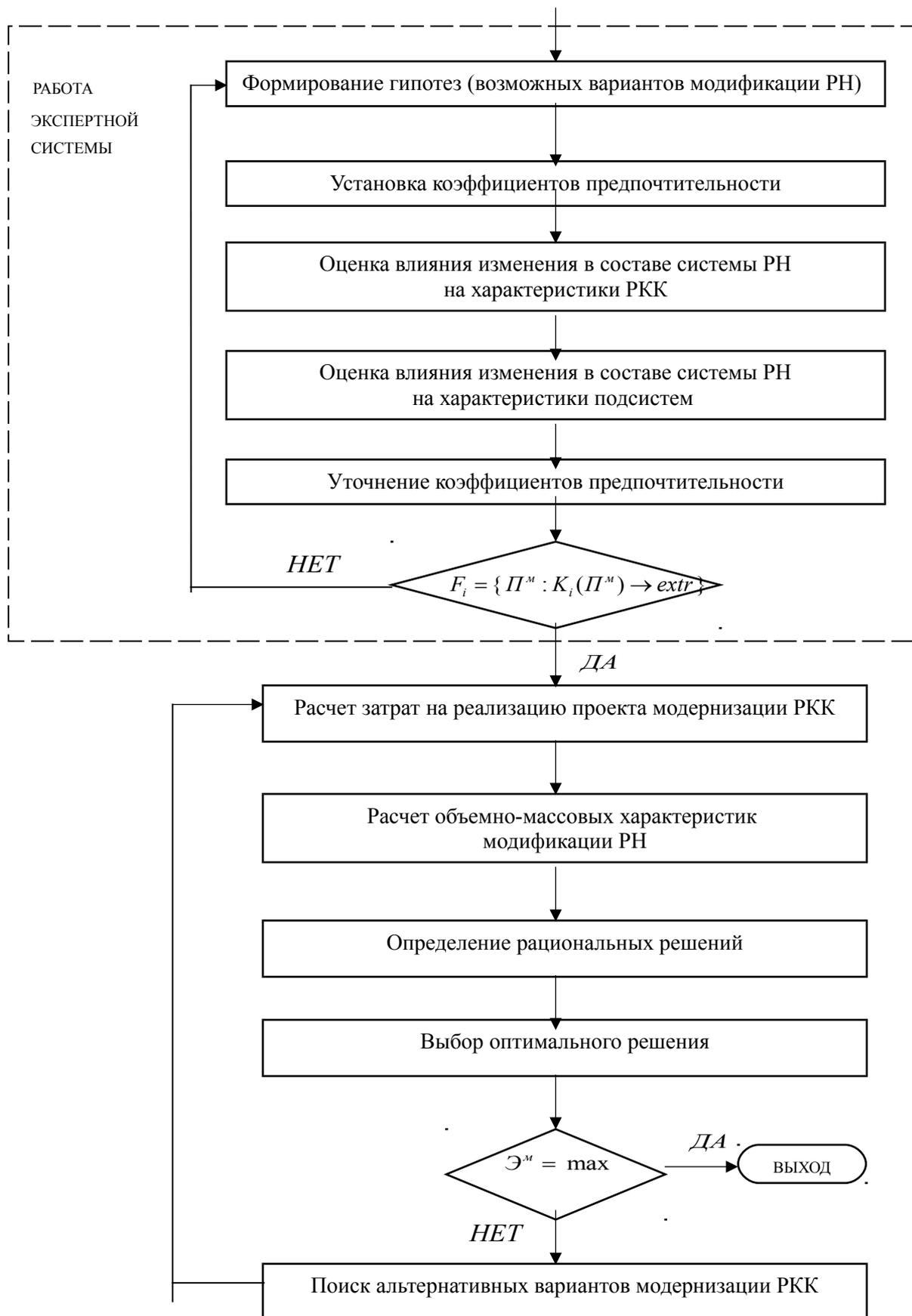


Рис.1 Алгоритм принятия проектного решения при исследовании модификации РН.

В процессе поиска рациональных проектных решений используется математическая модель экономической оценки проекта модернизации РКК [5]. Модель предусматривает оценку затрат на проект модернизации РКК, связанный с модификацией РН и доработкой наземного комплекса, и выполнения заданной транспортной операции.

На верхнем уровне управления разработкой рассматривается РКК, содержащий подсистемы: систему обеспечения (СО), ракету - носитель (РН), наземный комплекс (НК), систему управления (СУ). Процесс реализации проекта модернизации РКК включает этапы разработки, создания и эксплуатации. Суммарные затраты на реализацию проекта определяются зависимостью:

$$C_{\Sigma} = (C_{НИР}^{PH}(\cdot) + C_{ОКР}^{PH}(\cdot))(1+E)^{\tau_{PH}} + \\ + \left(C_{np}^{1PH}(\cdot) \frac{N^{1-\alpha}}{1-\alpha} + C_{НК}^1(\cdot) \frac{N}{N^*} \right) (1+E)^{\tau_{PH}} + C_{ЭК}^1(\cdot) N(1+E)^{\tau_{PH}};$$

где: $C_{НИР}^{PH}(\cdot), C_{ОКР}^{PH}(\cdot)$ - затраты на НИР и ОКР на разработку модификации РН;
 $C_{np}^{1PH}(\cdot)$ - затраты на производство первого образца модификации РН;
 $C_{НК}^1(\cdot)$ - затраты на разработку и проведение работ по доработке (созданию) РН;
 $C_{ЭК}^1(\cdot)$ - затраты на эксплуатацию на один пуск;

$\eta(\tau_{PH}) = (1+E)^{\tau_{PH}}$ - коэффициент приведения затрат, определяющий дополнительные потери, обусловленные отвлечением средств из бюджета государства;
 N - количество производимых РН для выполнения транспортных операций;
 N^* - количество запусков с одного НК в планируемый период;
 α - коэффициент снижения производства при выпуске продукции.

На нижнем уровне проводится более подробный анализ на создание заменяемых подсистем при модернизации РКК, определяются затраты на разработку, создание модификации РН:

$$C_{\Sigma} = \left[(1+K_{НИР}) K_C \sum_{i=1}^n (C_{ОКРi}^K(\cdot) + C_{ОКРi}^{ДВ}(\cdot) + C_{ОКРi}^{Обi}) \right] \cdot (1+E)^{\tau_{PH}} + \\ + \left[\left(\sum_{i=1}^{n_{СТ}} (C_{np}^{1K}(\cdot) + C_{np}^{ДВ}(\cdot)) \cdot K_{СБ} + C_{np}^{Обi}(\cdot) \right) \cdot K_{СБ}^{PH} \frac{N^{1-\alpha}}{1-\alpha} + \right. \\ \left. + (C_{np}^{МО} + C_{np}^{1СТР} + C_{np}^{1ПП}) \frac{N}{N^*} \right] \cdot (1+E)^{\tau_{PH}} + (C_T^1 + C_{ТЭ}^1 + C_{ОБ}^1) N \cdot (1+E)^{\tau_{PH}}.$$

где: $K_{НИР} = \frac{C_{НИР}}{C_{ОКР}}$; $0,2 < K_{НИР} < 0,35$;
 $K_C = 1,05 \div 1,07$ - коэффициент, учитывающий затраты на ОКР в целом.

Оценка технических характеристик модификации РН проводится по математической модели [1] расчета активного участка движения, энергетических и массовых характеристик двухступенчатых ракет-носителей. Уравнения движения на активном участке полета для 1-ой ступени имеют вид:

$$\frac{dt}{d\mu} = \frac{P_{yD01}}{n_{01}}$$

$$\frac{dV}{d\mu} = -\frac{g_0 P_{yD01}}{\mu} [\lambda - (\lambda - 1) \bar{P}_h] + \frac{dV_a}{d\mu} + \frac{dV_g}{d\mu}$$

$$\frac{dV_a}{d\mu} = \frac{g_0 P_{yD01}}{n_{01} \mu} \frac{C_x \rho V^2}{2P_M}$$

$$\frac{dV_g}{d\mu} = \frac{g_0 P_{yD01}}{n_{01}} \sin \vartheta$$

$$\frac{dx}{d\mu} = -\frac{P_{yD01}}{n_{01}} V \cos \vartheta$$

$$\frac{dy}{d\mu} = -\frac{P_{yD01}}{n_{01}} V \sin \vartheta$$

$$\vartheta = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \mu > \mu_1 \quad (t < t_B) \\ \vartheta_{K1} + \frac{\frac{\pi}{2} - \vartheta_{K1}}{(\mu_1 - \mu_{K1})^2} (\mu - \mu_{K1})^2 & \mu \leq \mu_1 \quad (t \geq t_B) \end{cases}$$

где: $\mu = \frac{m}{m_0}$ - относительная масса;

$\lambda = \frac{P_{yD01}}{P_{yD01}}$ - параметр высотности двигателя;

$\bar{P}_h = \frac{P_h}{P_0}$ - относительное атмосферное давление;

t_B - время вертикального участка движения;

μ_1 - относительная масса, соответствующая t_B ;

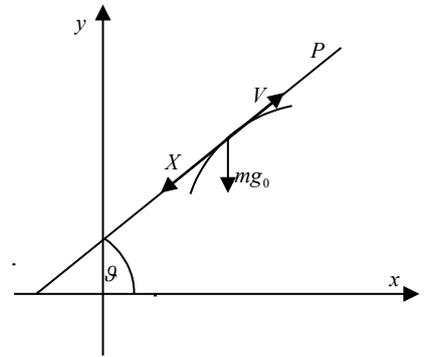


Рис. 2

$$P = P_{01} [\lambda - (\lambda - 1) \bar{P}_h]$$

$$X = \frac{C_x S_M \rho V^2}{2}$$

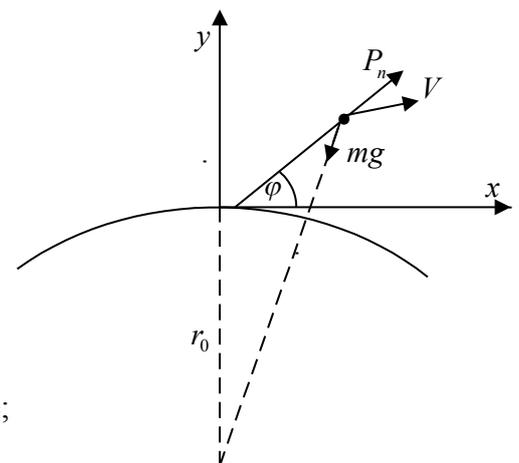


Рис. 3

Уравнения движения на активном участке полета 2-ой ступени:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dV_x}{dt} = -g_0 \frac{r_0^2}{r^2} \frac{x}{r} + \frac{P}{m} \cos \varphi$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dW_y}{dt} = -g_0 \frac{r_0^2}{r^2} \frac{(y^0 + y)}{r} + \frac{P}{m} \sin \varphi$$

$$r = \sqrt{x^2 + (r_0 + y)^2}$$

Реализуется движение с линейной программой угла тангажа, которая обеспечивает энергетически оптимальную траекторию: $\varphi = \varphi_0 + \dot{\varphi}_0 t$

Таким образом, расчетные математические модели позволяют оценить с заданной точностью изменение экономических и технических характеристик носителя в результате модификации и провести сравнительный анализ рассматриваемых вариантов модернизации РКК.

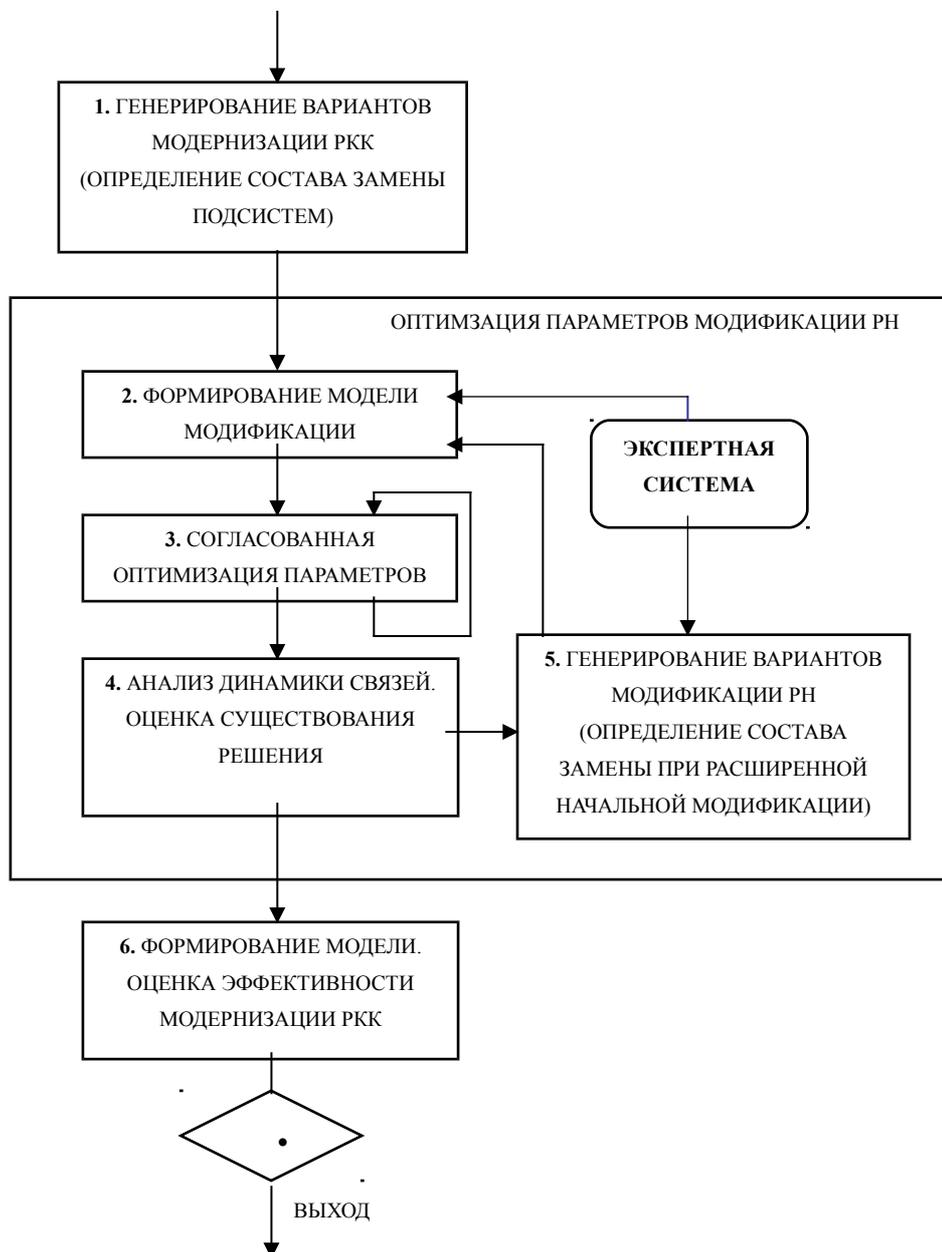


Рис. 4. Экспертная система в алгоритме организации проектных работ при комплексном исследовании модификации РН.

Применение экспертной системы в алгоритме организации проектных работ при комплексном исследовании модификации летательного аппарата [4] позволяет сократить количество этапов работы алгоритма (рис. 4). Так применение экспертной системы может оказать положительное влияние на процесс проектирования на этапах генерирования модификации РН, характеризуемый определением состава замены при расширенной начальной модификации, и формирования модели модификации. Причем пункт 4 рассматриваемого алгоритма, связанный с оценкой существования решения выполняется автоматически, т. к. анализ существования решения проводится на ранних стадиях поиска.

На основе разработанной методики определения рациональных проектных решений в процессе исследования модификации РН проведен поиск технических решений улучшения характеристик существующих носителей с применением базовой экспертной системы. В результате работы программы были сформированы рекомендуемые варианты модификации носителя. Проведенные расчеты показали улучшение технических и экономических характеристик в результате доработки РН и соответствие рентабельности проекта модернизации РКК ожидаемым показателям. Таким образом, становится очевидной эффективность предложенного метода поиска проектных решений с применением экспертной системы в процессе исследования модификации РН и модернизации РКК. Реализация такого подхода при решении задач модернизации ракетно-космической техники позволяет снизить трудоемкость проектных работ за счет отбраковки заранее неперспективных вариантов решений на ранних этапах поиска.

Анализ полученных результатов исследований позволяет сделать следующие основные выводы:

- сформулирован подход решения задачи прогнозирования рентабельности проекта модернизации РКК с использованием формализованной экспертной оценки;
- разработана методика применения экспертной системы в процессе поиска технических решений, связанных с модернизацией РКК;
- разработана базовая экспертная система, содержащая блок экспертных оценок, сформулированы основные принципы ее применения в процессе поиска рациональных решений;
- сформулирован подход к повышению эффективности проектных работ за счет раннего отсева неперспективных вариантов;
- определены направления дальнейшего развития систем автоматизированного проектирования летательных аппаратов за счет включения в их состав специализированных экспертных систем;
- проведены расчеты РН и их модификаций, определены возможности улучшения характеристик существующих РН, подтверждающие эффективность предложенного метода.

Список литературы:

1. Аппазов Р.Ф., Лавров С.С., Мишин В.П. Баллистика управляемых ракет дальнего действия. – М.: Наука, 1966. 308 с.
 2. Гущин В.Н. Информационно-компьютерная технология (ИК-технология) разработок летательных аппаратов. – Жуковский: Авиационный Печатный Двор, 2001. 248 с.
 3. Джексон П. Введение в экспертные системы. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 624 с.
 4. Матвеев Ю.А. Методы исследования модификации при разработке летательных аппаратов: Учебное пособие.– М: Издательство МАИ, 1992. 64с.
 5. Матвеев Ю.А., Щеверов Д.Н. Экономическая оценка реализации проектов ракетно-космической техники: Учебное пособие. – М.: Издательство МАИ, 2005. 96 с.
 6. Основы проектирования летательных аппаратов (транспортные системы) // Мишин В.П., Безвербый В.К., Панкратов Б.М., Зернов В.И.; Под ред. А.М. Матвеевко, О.М. Алифанова. – М.: Машиностроение, 2005.
 7. Уманский С.П. Ракеты-носители. Космодромы. – М., Издательство Рестарт+. 2001 – 216 с.
-

Сведения об авторах:

Зернов Владимир Игоревич, к.т.н., доцент кафедры Космические Системы и Ракетостроение Московского авиационного института (государственного технического университета), тел. 8(499)1584204.

Парамонов Александр Павлович, соискатель кафедры Космические Системы и Ракетостроение Московского авиационного института (государственного технического университета).

