

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ КОНВЕРТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ

© М.Ю. Воробьев

Самарский государственный аэрокосмический университет
(Национальный исследовательский университет)

Рассмотрены вопросы повышения экономической эффективности компрессорных станций за счет определения оптимального набора газоперекачивающих агрегатов на базе конвертированных авиационных двигателей с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Разработана экономико-математическая модель по определению оптимального количества газоперекачивающих агрегатов.

Экономико-математическая модель, конвертирование авиационных двигателей, эксплуатационные затраты, стоимость

Введение.

В современной сложной экономической обстановке, сложившейся на предприятиях по разработке и созданию авиационных двигателей, актуальной становится проблема применения их продукции для нужд народного хозяйства. Уже имеется опыт применения газотурбинных двигателей (ГТД) не только в составе силовых установок самолётов и вертолётов, но и в наземных установках.

Перечень таких установок довольно обширен: установки морского и речного транспорта; установки для получения сжатого воздуха, используемого в технологических целях, в системах наддува транспортных средств на воздушной подушке; установки для получения нагретого газа, используемого для обогрева строительных и производственных объектов, а также в сушильных установках; энергокомплексы бурильных установок; газоструйные установки для очистки взлетно-посадочных полос аэродромов, транспортных путей от снега, мусора и т. д.

Кроме того, практическую реализацию получили газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом различной производительности. Эксплуатация таких установок на предприятиях ОАО «Газпром» показала высокую экономичность, безотказность и долговечность газотурбинного привода.

Газоперекачивающие агрегаты Единой системы газоснабжения ОАО «Газпром» осуществляют транспортировку природного газа на значительные расстояния. Их суммарная мощность составляет 42,0 млн. кВт [4].

Газоперекачивающий агрегат (ГПА) состоит из нагнетателя природного газа (газового компрессора), привода и ряда систем жизнеобеспечения (масляной, топливной и др.). В качестве приводов нагнетателей природного газа используются газотурбинные двигатели (86 % от общей мощности), электрические приводы – 13 % (планируется дальнейшее снижение их количества), и поршневые – менее 1 % [4].

Процессы адаптации авиационного (самолётного, вертолётного) газотурбинного двигателя к наземным условиям эксплуатации называют конвертированием, а двигатель, получаемый в результате действия этих процессов – конвертированным. При конвертировании проводят расчет параметров двигателя при новых рабочих условиях (температура и давление воздуха на входе в двигатель), соответствующих уровню поверхности земли, вносят изменения в топливную систему (вместо керосина в качестве топлива применяют природный газ или другие альтернативные источники энергии). Кроме того, проектируют дополнительный элемент конструкции – свободную (силовую) турбину, если

базовый двигатель не имел такого конструктивного элемента.

Под базовым двигателем в данной работе понимается авиационный газотурбинный двигатель подвергаемый процессам конвертирования.

В результате конвертирования удастся сохранить до 70-80% элементов конструкции авиационного газотурбинного двигателя. При этом к названию двигателя, как правило, приписывают «СТ» («со свободной турбиной»). Подробно о технических проблемах процесса конвертирования и его преимуществах описано в работе [7].

Развитие Единой системы газоснабжения ОАО «Газпром» требует разработки, производства и внедрения газотурбинных двигателей для их применения в наземных установках.

Перспективы решения данной задачи следующие:

1 Использовать производственные мощности авиационных предприятий для разработки и производства новых газотурбинных двигателей наземного назначения.

2 Использовать с определенными доработками авиационные газотурбинные двигатели, отработавшие летный ресурс на летательных аппаратах, для продолжения их эксплуатации в наземных установках до выработки располагаемого технического ресурса.

Очевидно, что второе направление с экономической точки зрения является более перспективным. Однако, на пути решения указанной задачи возникает проблема оценки экономической эффективности мероприятий по конвертированию авиационных двигателей по сравнению с затратами на создание нового двигателя для наземного использования.

С учетом сказанного, задача конвертирования авиационных газотурбинных двигателей для использования их в наземных условиях является актуальной и для своей реализации требует разработки специальных методов и средств экономического обоснования.

Разработка модели.

Основными целями Комплексной программы на 2007-2010 годы являются повышение эффективности газотранспортной системы ОАО «Газпром», обеспечение транспортировки планируемых потоков газа и надёжности работы единой системы газоснабжения (ЕСГ), а также повышение промышленной и экологической безопасности объектов газотранспортной системы. Помимо работ по реконструкции газопроводов планируется замена более 500 газоперекачивающих агрегатов.

Парк ГПА с газотурбинным приводом (около 3000 шт.) насчитывает более 20 различных наименований единичной мощностью от 2,5 до 25 МВт с коэффициентом полезного действия (КПД) от 23 до 35 %.

Находящиеся в эксплуатации газотурбинные двигатели имеют значительную наработку: 27 % – от 70 до 100 тыс. ч, 17 % – более 100 тыс. ч [4]. С увеличением наработки потребность в новых газотурбинных двигателях для оснащения ими ГПА будет возрастать.

При выборе современных ГПА различных модификаций для строительства компрессорных станций (КС), в основном, сравниваются паспортные характеристики их приводов – газотурбинных двигателей. Например, по методике одного из ведущих проектных институтов ДОО «Гипрогазцентр» (г. Нижний Новгород) выбор основан на сравнении различных характеристик по паспортным данным: мощности, КПД, расходу топлива, пускового газа, смазочного и уплотнительного масла. При этом показатели по ресурсосбережению, материалоемкости, как правило, не учитываются, хотя это непосредственно влияет на капитальные вложения, эксплуатационные затраты [5].

В данной работе предлагается экономико-математическая модель определения оптимального количества ГПА на компрессорной станции с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Выбор оценочного критерия для определения оптимального количества ГПА должен осуществляться в

соответствии с основным функциональным назначением компрессорной станции – выполнение определенного объема работ по транспортировке природного газа Q .

Задача заключается в выборе такого количества ГПА, при котором выполняется требуемый объем работ с получением максимальной прибыли от реализации природного газа потребителям, что возможно при сокращении затрат на обеспечение его транспортировки.

В начале решения данной задачи необходимо определиться с набором модификаций ГПА, способных выполнять заданный объем работ Q за требуемый период времени T . Пусть X множество модификаций ГПА, характеризующихся определённой стоимостью C_i и производительностью q_i . Причём ГПА каждой модификации можно применять несколько раз, ограничением данного условия служит производственная мощность завода-производителя. Тогда аналитически задачу можно записать в первом приближении так:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i \rightarrow \min, \\ \sum_{i=1}^n q_i \cdot T \cdot x_i \geq Q, \\ X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x_i \in \{0, 1\}, 1 < i < n. \end{cases} \quad (1)$$

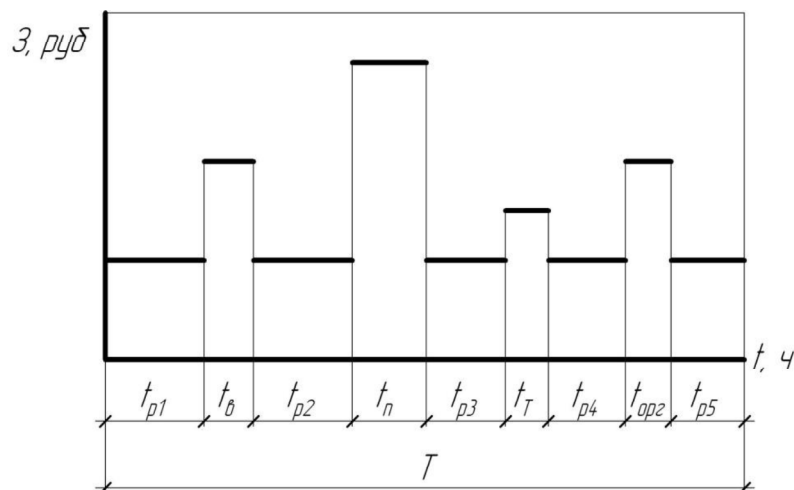


Рис. 1. Диаграмма использования ГПА

Из приведенной диаграммы видно, что при принятом календарном периоде эксплуатации T объем работ по

где n – количество модификаций ГПА.

Учитывая длительные сроки эксплуатации ГПА (порядка 20 лет), в полученной модели (1) необходимо учесть сведения о плановых эксплуатационных затратах Z_i .

Под плановыми эксплуатационными затратами в данной работе понимаются прогнозируемые затраты, соответствующие периоду времени T и обусловленные паспортными значениями расхода горючесмазочных материалов (ГСМ), периодичности и трудоёмкости технического обслуживания и ремонтов, потребления электроэнергии и т.д.

Тогда модель (1) примет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (C_i + Z_i) \cdot x_i \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^n q_i \cdot T \cdot x_i \geq Q, \\ X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x_i \in \{0, 1\}, 1 < i < n. \end{cases} \quad (2)$$

Процесс эксплуатации ГПА в общем случае может быть представлен в виде линейного графика, построенного во времени (рис. 1) [2].

транспортировке газа Q выполняется только при использовании ГПА по

прямому назначению (участки $t_{p1}, t_{p2}, t_{p3}, t_{p4}, t_{p5}$). Остальные участки соответствуют проведению плановых ремонтов t_n , технического обслуживания t_T , неплановых ремонтов t_e и организационных простоев t_{opz} .

Неплановые ремонты, как правило, обусловлены внезапными отказами ГПА и характеризуют его надёжность.

К организационным простоям относятся неплановые остановки, связанные с недостатками в организации производства. Чаще всего причинами подобных простоев являются перебои в электроснабжении, остановки смежных систем, нарушение трудовой дисциплины и т.д [2].

На основании приведенной диаграммы можно записать еще одно ограничение, согласно которому плановый объем работ Q будет выполняться тем быстрее, чем совершенней система технической диагностики и принятая стратегия технического обслуживания и ремонта у конкретной модификации ГПА, определяющие периодичность проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту. Время простоя на конкретном техническом обслуживании или ремонте определяется трудоёмкостью соответствующих работ.

Участки графика $t_{p1}-t_{p5}$ при неограниченном календарном периоде эксплуатации в сумме образуют назначенный ресурс ГПА t_i , в частности его привода – газотурбинного двигателя. Следовательно, можно записать:

$$\begin{cases} t_i = \sum_{k=1}^l t_{p_k}^i, \\ 1 < k < l, \\ 1 < i < n. \end{cases} \quad (3)$$

где $t_{p_k}^i$ – продолжительность использования i -го ГПА по прямому назначению или время совершения полезной работы в k -м периоде;

l – количество интервалов времени, соответствующих $t_{p_k}^i$.

Введем критерий, характеризующий совершенность системы технической диагностики и принятой стратегии технического обслуживания и ремонта K_c ,

соответствующий суммарному времени простоя ГПА на плановых и неплановых ремонтах, техническом обслуживании и прочих простоях.

$$\begin{cases} K_{c_i}^i = \sum_{m=1}^r t_{n_m}^i + \sum_{d=1}^f t_{T_d}^i + \sum_{g=1}^e t_{e_g}^i + \sum_{u=1}^z t_{opz_u}^i, \\ 1 < m < r, 1 < i < n, \\ d < f, \quad g < e, \quad u < z \end{cases}$$

где $K_{c_i}^i$ – критерий совершенности системы технической диагностики и принятой стратегии технического обслуживания и ремонта i -ой модификации ГПА;

$t_{n_m}^i$ – продолжительность планового ремонта;

$t_{e_g}^i$ – продолжительность непланового ремонта;

$t_{T_d}^i$ – продолжительность технического обслуживания;

$t_{opz_u}^i$ – продолжительность организационных простоев;

r, f, e, z – количество плановых, неплановых ремонтов, технических обслуживаний и организационных простоев соответственно.

Таким образом, для любого ГПА заданный период времени T состоит из суммарного времени совершения полезной работы и суммарного времени простоя на плановых и неплановых ремонтах, техническом обслуживании и прочих простоях.

$$T = \sum_{k=1}^l t_{p_k}^i + K_{c_i}^i,$$

С учётом сказанного получим:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (C_i + 3i) \cdot x_i \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^n q_i \cdot (T - K_{c_i}^i) \cdot x_i \geq Q, \\ x_i \in \{0, 1\}, \quad 1 < i < n. \end{cases} \quad (4)$$

Полученная модель относится к задачам целочисленного программирования и в общем случае может быть решена методами направленного перебора. Из них

наиболее известен метод ветвей и границ [9].

Модель (4) можно рассмотреть в контексте выбора привода для газоперекачивающего агрегата (вновь разработанный или конвертированный газотурбинный двигатель). Тогда при прочих равных (плановых эксплуатационных затратах Z_i , производительности q_i , критерии K_{ci}) наиболее значимым фактором для принятия решения становится стоимость привода (стоимость ГПА C_i).

Затраты на создание нового двигателя распределяться по соответствующим этапам: проектирование, государственные испытания, сертификация, производство.

Проектирование включает в себя расчёт параметров двигателя, изготовление опытных образцов, испытания на стендах отдельных узлов и двигателя в целом, их доводка.

Государственные испытания проводятся независимой от проектной организации комиссией после завершения всех проектных работ. На основании результатов государственных испытаний делается заключение о годности к применению двигателя в данной отрасли промышленности.

С целью обеспечения выхода на международный рынок проводится добровольная сертификация двигателя.

Заключительным этапом разработки двигателя является производство. Оно включает подготовку производства, выпуск первых образцов и начало серийного производства.

На этапе проектирования, государственных испытаний и сертификации большую часть затрат составляет заработная плата работников интеллектуального труда (60-65%), 35-40% приходится на изготовление опытных образцов, их испытания и доводку.

На этапе производства заработная плата персонала составляет лишь 30-35% в общей доле затрачиваемых средств.

По данным ведущих организаций в области проектирования и производства газотурбинных двигателей продолжительность разработки нового

двигателя составляет 5-7 лет [8], что оказывает влияние на величину затрат и, соответственно, на цену нового двигателя.

При конвертировании сроки проектных работ составляют 10-16 месяцев. Двигатель, отработавший свой летный ресурс, ремонтируют, вносят необходимые изменения в конструкцию и продолжают его эксплуатации в составе наземной установки.

Стоимость конвертированного двигателя гораздо ниже стоимости вновь разработанного для выполнения той же задачи народно-хозяйственного значения и соизмерима со стоимостью двигателя после проведения капитального ремонта. Например, средняя стоимость новых двигателей Д-30КУ-154, составляет около миллиона долларов, стоимость такого двигателя после проведенного капитального ремонта - с полным межремонтным ресурсом достигает 370000 долл. США. Стоимость нового двигателя ПС-90А оценивается в 2-3 млн. долл. США (по предложениям в 2000-2003 г.), а цена такого же типа авиадвигателя после капитально-восстановительного ремонта оценивалась в сумму примерно 1-1,5 млн. долл. США [6].

Заключение.

Таким образом, изложенные выше результаты исследования позволяют сделать вывод о целесообразности конвертирования авиационных двигателей в современных условиях для их применения в наземных энергетических установках.

Результатом проведенного исследования служит разработанная модель экономического обоснования конвертирования авиационных двигателей для применения на компрессорных станциях, позволяющая повысить эффективность их использования в наземных условиях. Данные результаты могут быть использованы: заказчиками для самостоятельной технической и экономической оценки эффективности финансирования проектов конвертирования авиационных двигателей за счет собственных источников в соответствии с собственными потребностями; прочими инвесторами,

которых интересует инвестирование перспективных программ; исполнителями, которые заинтересованы в создании конкурентоспособной продукции под заказ потребителя, проектными организациями

Библиографический список

1. Официальный сайт ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» [электронный ресурс]. URL: <http://sntk.info/>.
2. Изотов С.П., Шашкин В.В., Капралов В.М. и др. Авиационные ГТД в наземных установках / Под общ. ред. В.В. Шашкина. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 228 с.
3. Сайт ОАО «Газпром» (раздел транспортировка) [электронный ресурс]. URL: <http://gazpromquestions.ru/>.
4. Интервью с А. Шайхутдиновым. Наши требования: надёжность, эффективность, экологичность. // Двигатель. 2001, №2 (14), с. 8-12.
5. Микаэлян Э. Требования к эксплуатационной пригодности газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. // Газотурбинные технологии. 2004, №1, с. 12-15.

References

1. Official site of «SNTK of N.D.Kuznetsova» [electronic resource]. URL: <http://sntk.info/>.
2. S. P. Izotov, V. V. Shashkin, V. M. Kapralov and other. Aviation gas turbine engines in ground installations/ Under commonly. Ed. V. V. Shashkina. - L.: Mashinostroenie, Leningr. Sci-tion, 1984. - 228 pp.
3. Site OAO Gazprom (Section transportation) [electronic resource]. URL: <http://gazpromquestions.ru/>.
4. Interview to A.Shajhutdinov. Our requirements: reliability, efficiency, environmental friendliness.// The Engine. 2001, №2 (14), pp. 8-12.
5. Mikaelian E. Requirements for usability gas turbine compressor units.// Gas turbine technology. 2004, № 1, pp. 12-15.

для разработки технических решений по обновлению производственных мощностей предприятий, использующих в своей работе авиационные двигатели.

6. Сайт отраслевого агентства «АвиаПорт» [электронный ресурс]. URL: www.aviaport.ru.
7. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения/ Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, С.В. Лукачёв и др. Производственно-техническое издание/ СНЦ РАН, Самара, 2004, 266 с
8. М. Кузменко. Создание двигателя пятого поколения – задача, технически более сложная, чем разработка нового самолета: [интервью, электронный ресурс].// Интерфакс – Агенство Военных Новостей. 2010 г. URL: <http://www.militarynews.ru/excl.asp?ex=21>. (дата обращения 15.08.2010 г.).
9. А.И. Орлов. Теория принятия решений. Учебное пособие. – М.: Издательство «Март», 2004. – 656 с.
10. Иванов Д.Ю., Шаркевич В.И. Моделирование механизмов управления проектами промышленных предприятий// Интеграл. 2010, №3 (53), с. 74-76.

6. Site of branch agency "Aviaport" [electronic resource]. URL: www.aviaport.ru.
7. Conversion of gas turbine engines in the gas turbine plant of land application / E. A. Gritsenko, V. P. Danilchenko, S. Lukachev and other production-technical publication / GHQ Academy of Sciences, Samara, 2004, 266 pp.
8. M. Kuzmenko. Creation of a fifth-generation engine - the problem is technically more difficult than designing a new aircraft: [electronic resource].// Interfax - Military News Agency. 2010 URL: <http://www.militarynews.ru/excl.asp?ex=21>.
9. A.I. Orlov. Decision theory. Textbook. - Moscow: Publishing House "March, 2004. - 656.
10. Ivanov D.Y., Sharkevich V.I. Simulation of mechanisms of project management of industrial enterprise. Integral. 2010, № 3 (53), pp. 74-76.

QUESTIONS OF ECONOMIC JUSTIFICATION CONVERTING AVIATION ENGINES FOR USE IN COMPRESSOR STATIONS OF UNIFIED GAS SUPPLY SYSTEM

© M. Y. Vorobyov

Samara State Aerospace University
(National research university)

Questions of economic efficiency of compressor stations by determining the optimal set of gas pumping units on the basis of the converted aircraft engine with the required performance. The economic-mathematical model to determine the optimum amount of gas pumping units.

Economic-mathematical model, conversion aviation engines, operating costs, cost

Сведения об авторах

Воробьев Михаил Юрьевич, ассистент кафедры организации производства Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (СГАУ). Email: mvorobyov@mail.ru. Область научных интересов: разработка моделей экономического обоснования проектов в авиационной промышленности.

Mikhail Vorobyov, the assistant of the organization of production of the Samara State Aerospace University (SSAU). Email: mvorobyov@mail.ru. Area of scientific interests: modelling economic feasibility of projects in the aviation industry.