

УДК 629.735.45.036

Анипко О.Б., Иленко Е.Ю.

ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ВЕРТОЛЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕРАСЧЕТНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба

В настоящее время в боевом составе видов Вооруженных Сил Украины находится более 550 боевых самолетов (Су-24, МиГ-29, Су-27, Су-25), 32 транспортных самолета, более 180 боевых вертолетов (Ми-8, Ми-24, Ми-26). В перспективе в организационно-штатной структуре Воздушных Сил Украины 2011 года планируется иметь 216 боевых самолетов, 26 транспортных самолетов; в Военно-Морских Силах – 4 противолодочных самолета и 10 противолодочных вертолетов; в Сухопутных войсках – 76 боевых вертолетов.

подавляющее большинство эксплуатирующихся сейчас объектов авиационной техники (АТ) и авиационных двигателей (АД), входящих в состав их силовых установок, выпущены в 80-х годах. Замена объектов АТ новыми образцами происходит медленно, несвоевременно и нерегулярно проводится капитальный ремонт авиационных двигателей, как исчерпавших свой межремонтный ресурс, так и досрочно снятых с эксплуатации по причине ресурсных отказов. Капитальный ремонт предусматривает полную разборку двигателей и дефектацию его систем, узлов и агрегатов в заводских условиях. Его отсутствие значительно ограничивает возможность модернизации АД на основе анализа данных о результатах дефектации, а также о причинах отказов и неисправностей, выявленных при эксплуатации, и особенно отказов, приводящих к досрочному снятию АД. Нарушен механизм обратной связи между эксплуатирующей организацией, ремонтным предприятием и предприятием – разработчиком [1].

Современный этап эксплуатации авиационной техники характеризуется низкой интенсивностью использования объектов по назначению – значительными сроками пребывания летательных аппаратов (ЛА) на хранении или их простоем в отсутствие полетов. Меняется структура жизненного цикла ЛА, что, в случае сочетания с особенностями эксплуатации, вызванными практической необходимостью, приводит к несоответствию показателей надежности объектов АТ установленным требованиям.

Силовая установка ЛА является одним из элементов, наиболее чувствительным к особенностям эксплуатации. Неполное знание и учет действительных условий работы АД и фактических нагрузок, отличных от расчетных, а также неточное воспроизведение их при испытаниях по оценке уровня надежности отдельных систем и изделия в целом, является одной из основных причин недостаточной надежности АД. Испытания авиационного двигателя на ресурс существенно больше по продолжительности и сложнее по условиям проведения в сравнении с испытаниями по определению технических характеристик. Однако испытания на ресурс не могут в полной мере дать оценку влиянию на надежность двигателя всех возможных сочетаний неблагоприятных факторов. Низкая интенсивность эксплуатации АД на протяжении последних 5–10 лет является нерасчетной для двигателей, проектируемых и выпущенных в 80-х годах, и приводит к ускоренной выработке двигателем своего ресурса. Возникла объективная необходимость оценки остаточного ресурса эксплуатируемых в настоящее время авиационных двигателей.

Такою оценку можно сделать на основе обработки экспериментальных исследований эксплуатации объектов авиационной техники в идентичных, с точки зрения однородности, условиях, отличных от расчетного режима эксплуатации [2]. Однако экспериментальные исследования подобного рода затруднительно проводить в связи с большими финансовыми и временными затратами, а также из-за необходимости обеспечения идентичности условий проведения эксперимента, при существующем разнообразии всех возможных сочетаний неблагоприятных факторов. Поэтому представляет ценность информация об отказах и неисправностях, полученная из летных частей, при эксплуатации серийных образцов АТ в условиях, отличных от расчетных.

Структурно-логическая схема решения научной задачи прогнозирования остаточного ресурса вертолетных двигателей представлена на рисунке 1.

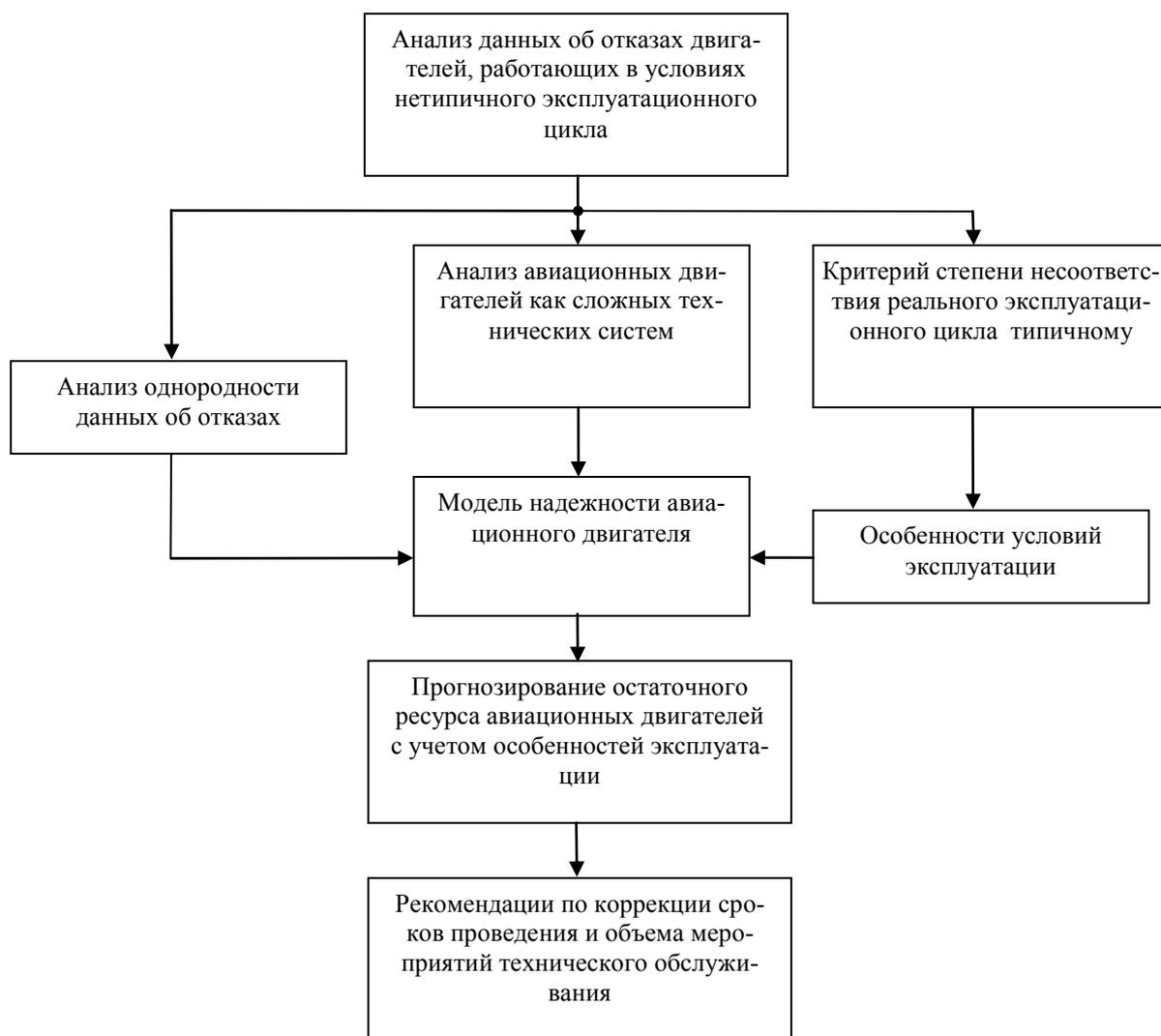


Рисунок 1 – Структурно логическая схема решения научной задачи прогнозирования остаточного ресурса вертолетных двигателей

Анализ эксплуатации вертолетных двигателей ГТД-350, входящих в состав силовых установок вертолетов Ми-2, в летных учебных частях выявил их низкий уровень надежности [3]. Нарботка на досрочное снятие АД ГТД-350 за период их использова-

ния с 1995 по 2006 год, для каждой группы двигателей в зависимости от межремонтного ресурса оказалась соизмерима с величиной межремонтного ресурса [3-4].

В условиях отсутствия объективной возможности проведения анализа физических причин отказов, приводящих к досрочному снятию двигателей в ремонт, в работе [1] использована вероятностно-статистическая модель эксплуатации на основе изменения вероятности безотказной работы вертолетных АД от времени наработки. Обоснование вида функции распределения времени безотказной работы осуществлено на основе исследования интенсивности появления ресурсных отказов рассматриваемых двигателей в зависимости от величины израсходованного ресурса. Установлено, что поток отказов, приводящих к досрочному снятию АД в ремонт, является Пуассоновским, удовлетворяющим условиям ординарности, стационарности и отсутствия последовательности, поэтому для проведения исследования использована экспоненциальная модель функции надежности:

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau}, \quad (1)$$

где $P(\tau)$ – вероятность безотказной работы по отношению к отказам, приводящим к досрочному снятию двигателя в ремонт, как функция наработки; τ – наработка двигателей в рассматриваемых условиях; λ – интенсивность отказов.

Прогнозирование остаточного ресурса основано на оценке среднего значения наработки группой объектов до достижения величиной показателя надежности своего порогового уровня (рис. 2). Достижение системой порогового уровня надежности в рамках заданного ресурса приводит к появлению ресурсных отказов [7], что становится причиной неполной выработки системой назначенного (межремонтного) ресурса.

На рисунке 2 представлен график изменения расчетного значения вероятности безотказной работы авиационного двигателя в процессе его эксплуатации до отправки в ремонт [5], описываемый выражением (1), где $\lambda = \lambda_{\text{расчетн}}$ соответствует расчетным условиям, а $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ – эксплуатации с учетом факторов, повышающих интенсивность истощения ресурса.

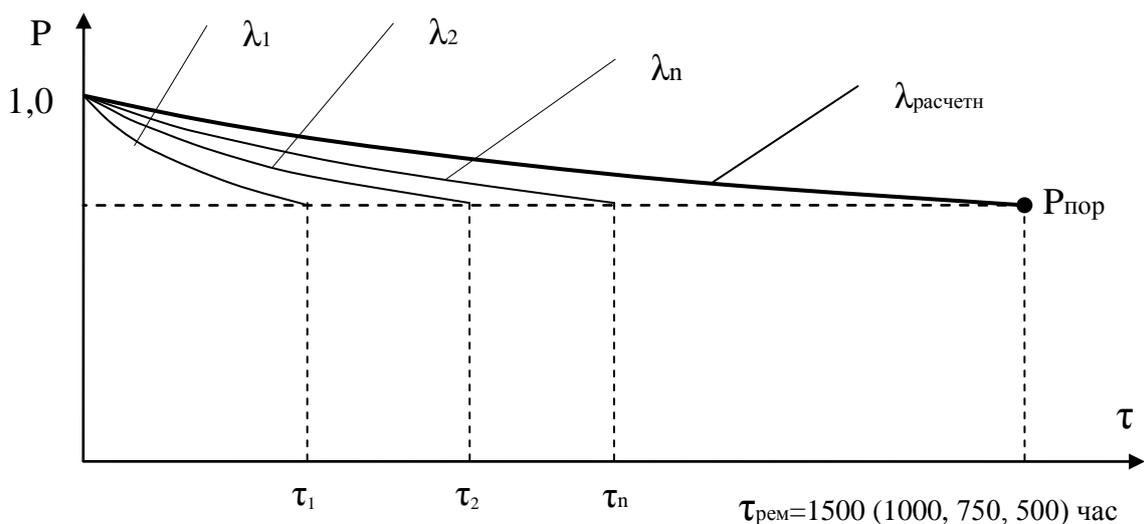


Рисунок 2 – Изменение надежности авиационного двигателя ГТД-350 в процессе его эксплуатации до ремонта

На основанні аналізу факторів, оказують вплив на надійність вертолетних двигателів (рис. 3), виявлено, що специфікою експлуатації двигателів в умовах учебної летної частини є характеристика експлуатаційного циклу, яка включає середню тривалість польоту та навантаженість циклу, тобто частку в ньому взлітних та номінальних режимів роботи двигача [3].



Рисунок 3 – Причини проведення на АД ГТД-350 капітальних ремонтів в поєднанні з факторами, впливаючими на надійність вертолетного АД

Ця особливість обумовлена вимогами програми курсу навчально-літної підготовки льотчиків, яка передбачає виконання певної кількості польотів з заданою тривалістю та строгим змістом польотного завдання [3,6]. На основі аналізу специфіки експлуатації вертолетного двигача ГТД-350 в умовах літної навчальної частини розроблено показувач ступеня невідповідності фактичного експлуатаційного циклу типовому (R) [1]:

$$R = \frac{T_{\text{э.ц.тип}}}{T_{\text{э.ц.факт}}} = \frac{T_{\text{э.ц.тип}} \cdot n_{\text{пос}}}{T_{\Sigma}}, \quad (2)$$

де $T_{\text{э.ц.тип}}$ – тривалість типового експлуатаційного циклу; $T_{\text{э.ц.факт}}$ – середня тривалість (фактична) експлуатаційного циклу в нерасчетном режимі експлуатації; $n_{\text{пос}}$ – кількість посадок вертолета; T_{Σ} – сумарна наработка двигачей в розглянутих специфічних умовах.

Значение $R=1$, когда средняя длительность фактического эксплуатационного цикла равна величине типичного цикла $T_{э.ц.факт} = T_{э.ц.тип}$. Если $R < 1$, значит $T_{э.ц.факт} > T_{э.ц.тип}$ и вертолет совершает меньшее количество посадок в процессе выработки межремонтного ресурса в сравнении с расчетным значением. Случай, когда $R > 1$, свидетельствует, что $T_{э.ц.факт} < T_{э.ц.тип}$ и количество посадок, совершаемых вертолетом, в R раз превосходит расчетное значение.

Установлено [1,3], что средняя продолжительность эксплуатационного цикла двигателя ГТД-350 при эксплуатации его в условиях летной учебной части в $R=1,93-2,2$ раза меньше продолжительности типичного цикла. Это приводит к перераспределению времени между этапами полета и увеличивает долю «тяжелых» режимов работы двигателя (номинального и взлетного). Возрастает число приемистостей двигателя и время его работы на неустановившихся режимах на протяжении выработки ресурса в R раз.

С целью получения классификации отказов двигателей ГТД-350 по системам, узлам и агрегатам, разработаны иерархические структурные схемы подсистем двигателя, которые представлены на рисунках 4–11.



Рисунок 4 – Структурная схема редуктора АД ГТД-350

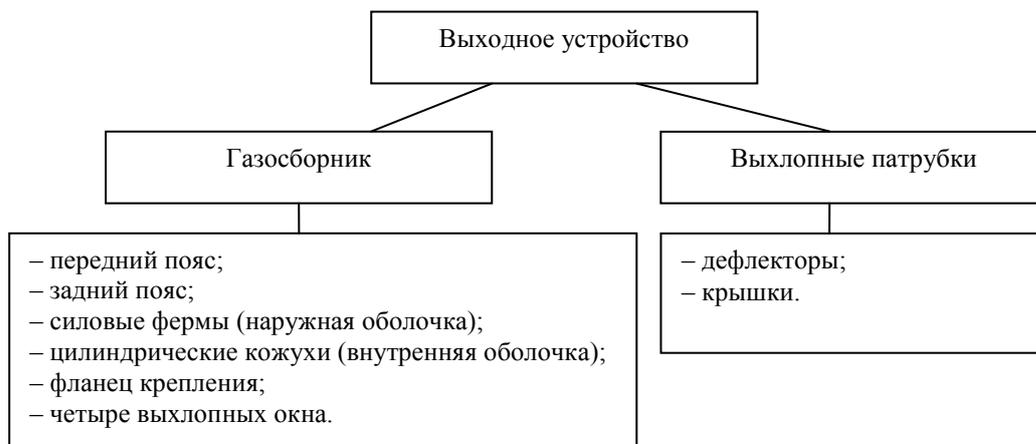


Рисунок 5 – Структурная схема выходного устройства АД ГТД-350

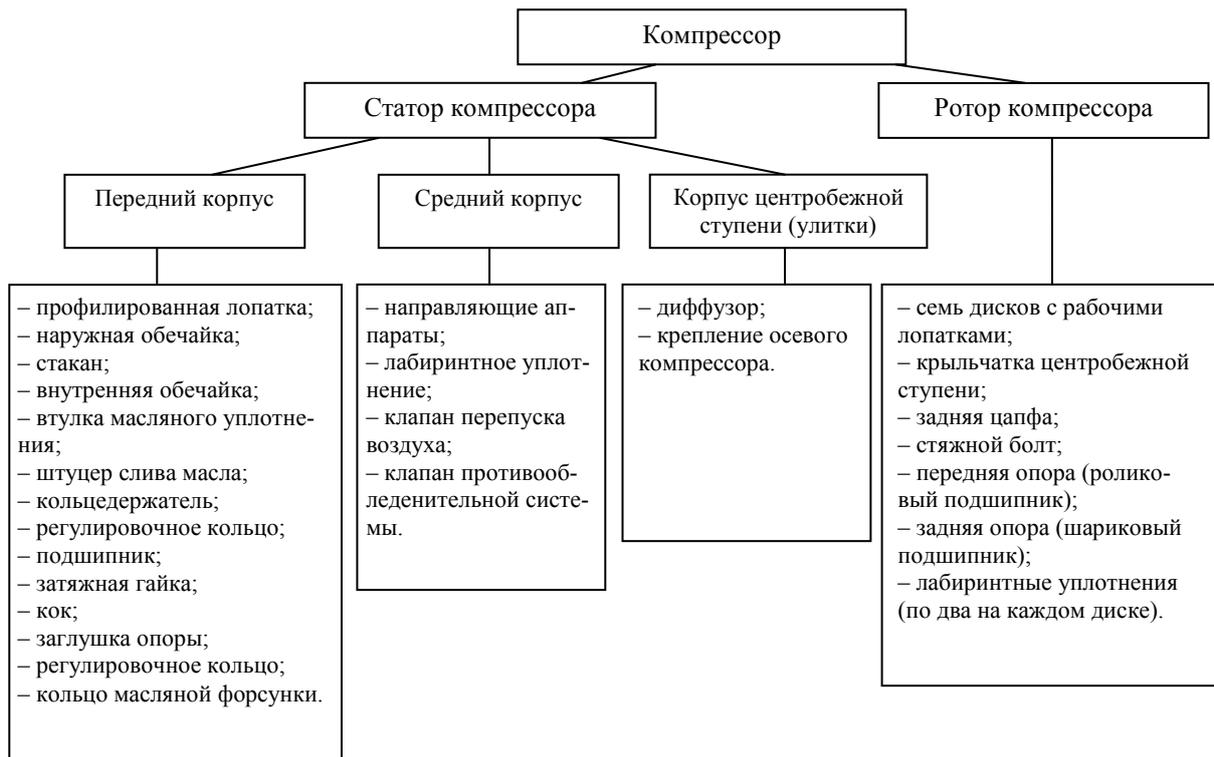


Рисунок 6 – Структурная схема компрессора АД ГТД-350

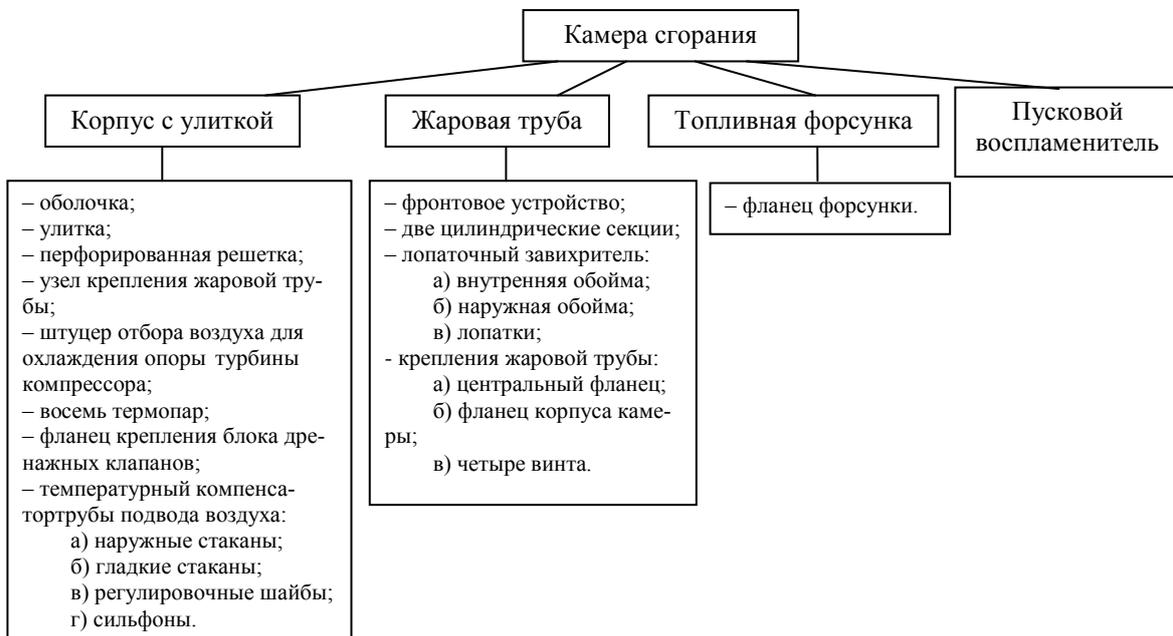


Рисунок 7 – Структурная схема камеры сгорания АД ГТД-350



Рисунок 8 – Структурная схема турбины компрессора АД ГТД-350

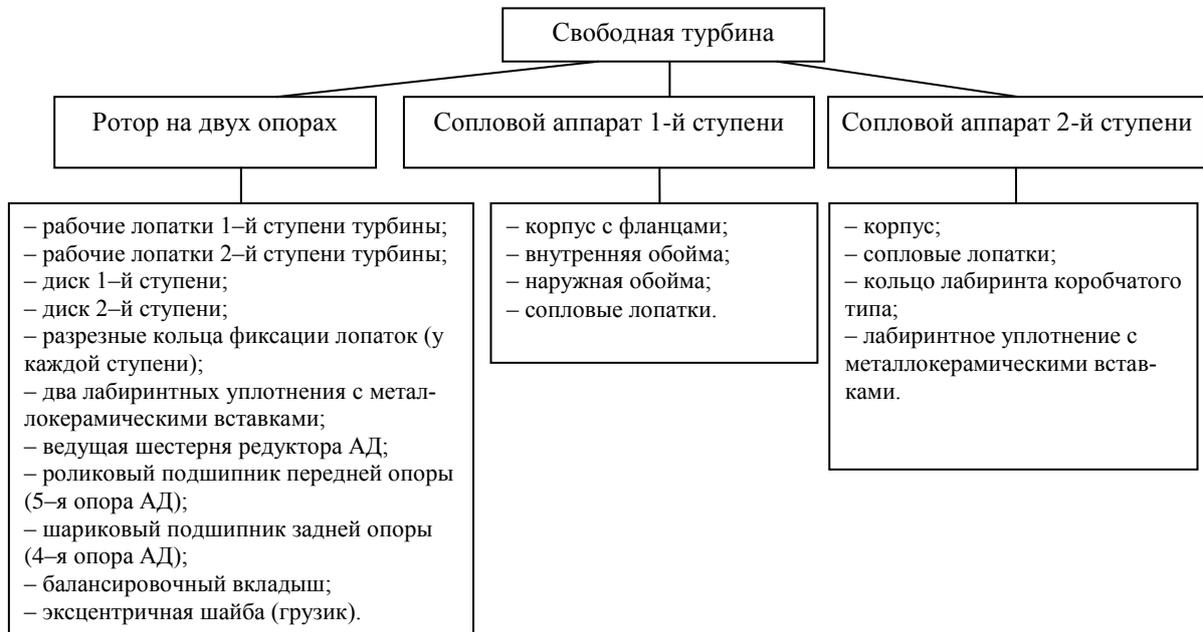


Рисунок 9 – Структурная схема свободной турбины АД ГТД-350

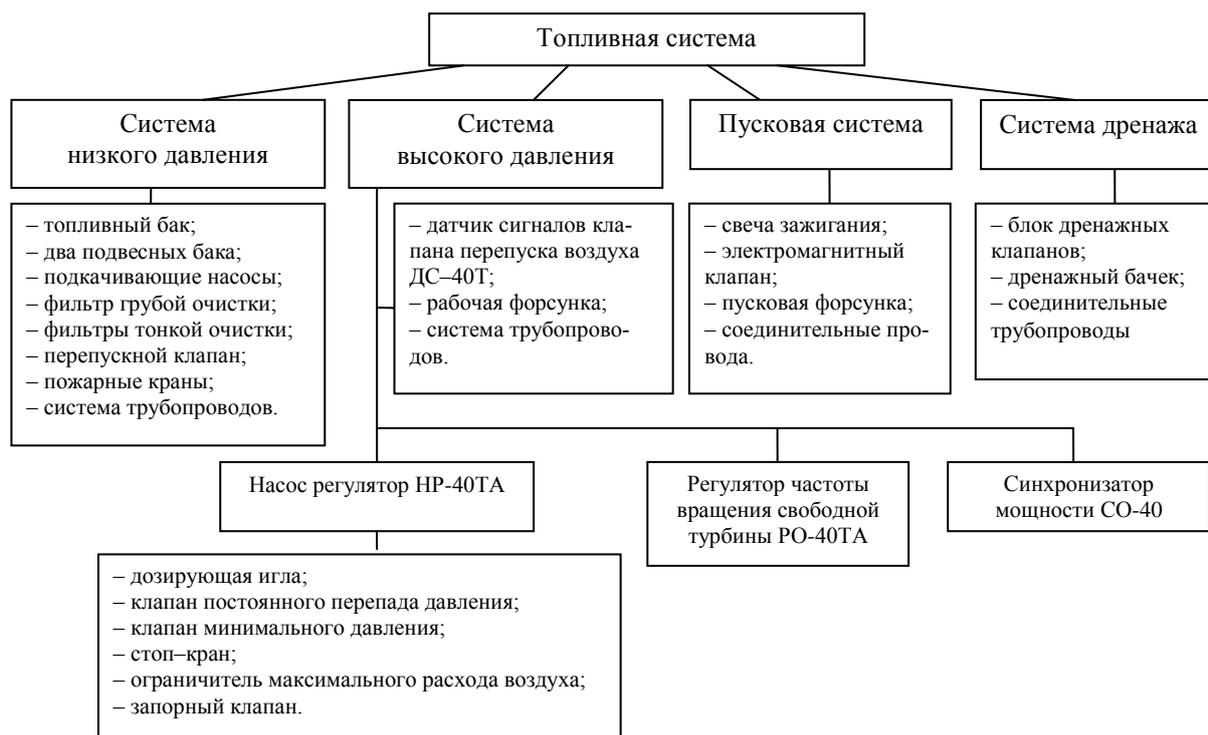


Рисунок 10 – Структурная схема топливной системы АД ГТД-350

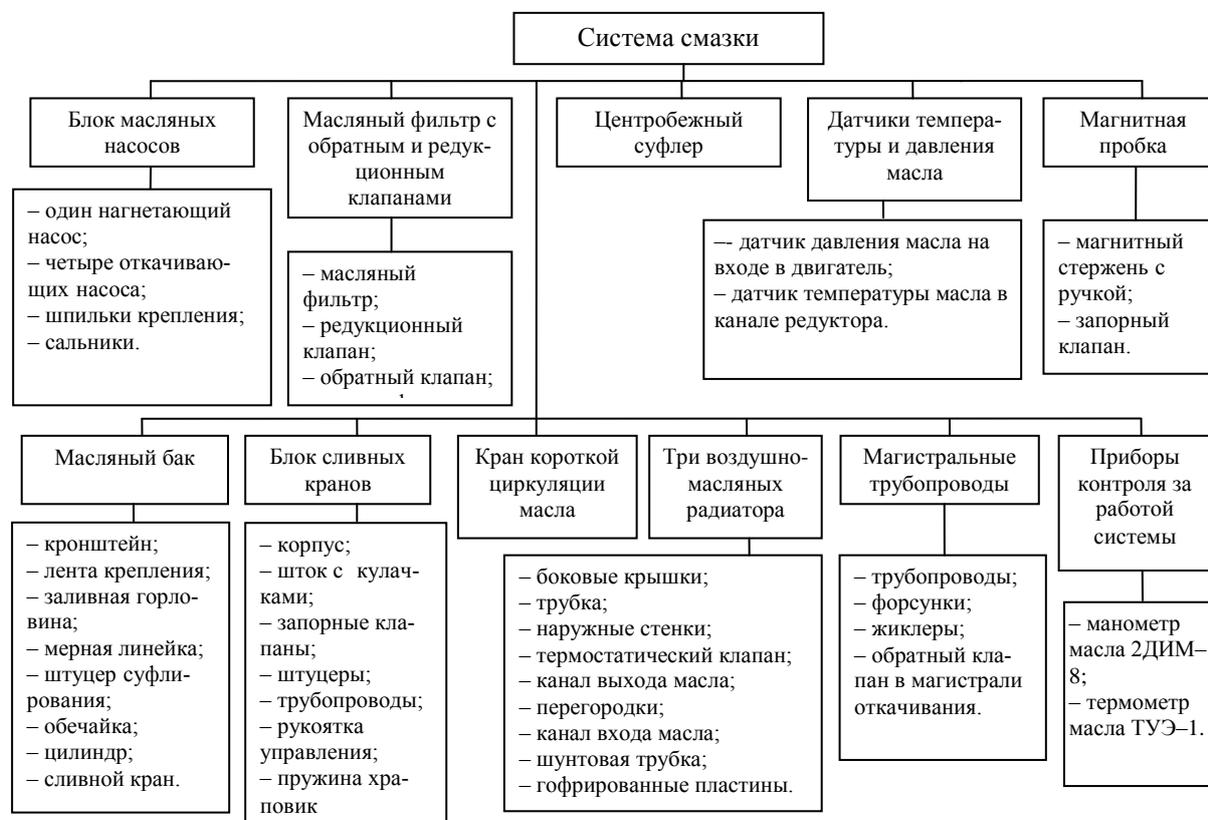


Рисунок 11 – Структурная схема системы смазки АД ГТД-350

Глубина анализа структуры определялась возможной степенью детализации при поиске отказавшего элемента специалистами эксплуатирующей организации. Иерархия элемента нижнего уровня зависела, во-первых, от существования физической возможности выхода из строя именно этого элемента, во-вторых, возможностью определить этот факт с помощью имеющихся средств контроля технического состояния.

По данным об эксплуатации вертолетных двигателей ГТД-350 в нерасчетных условиях, используя иерархические структурные схемы двигателя, разработана классификация отказов АД по системам, узлам и агрегатам [5].

Функция надежности двигателя (1) может быть представлена в виде уравнения следующего вида:

$$P(\tau) = k_1P_1(\tau) + k_2P_2(\tau) + \dots + k_nP_n(\tau), \quad (3)$$

где $P(\tau)$ – функция вероятности безотказной работы АД в целом; k_1, k_2, \dots, k_n – весовые коэффициенты, характеризующие вклад каждой из подсистем двигателя в величину показателя надежности, причем $k_1 + k_2 + \dots + k_n = 1$; $P_1(\tau), P_2(\tau), \dots, P_n(\tau)$ – функции распределения времени безотказной работы каждой из подсистем объекта.

Выражение $P(\tau)$ в левой части уравнения находится на основании данных о наработке до отказа группы вертолетных двигателей, эксплуатирующихся в одинаковых условиях. Весовые коэффициенты k_1, k_2, \dots, k_n получают из анализа данных об отказах подсистем объекта как долю отказов каждой отдельной подсистемы из общего числа отказов объекта. Функции распределения времени безотказной работы подсистем $P_1(\tau), P_2(\tau), \dots, P_n(\tau)$ находят на основании данных о наработке до отказа каждой из подсистем двигателей рассматриваемой группы.

Классификация отказов [5] позволяет определить величины весовых коэффициентов для решения задачи разложения функции надежности по подсистемам. Тогда уравнение (1) с учетом (3) принимает вид:

$$e^{-\lambda t} = 0,128P_{\text{тк}}(\tau) + 0,128P_{\text{рд}}(\tau) + 0,064P_{\text{ву}}(\tau) + 0,043P_{\text{тс}}(\tau) + 0,638P_{\text{сц}}(\tau), \quad (4)$$

где $P_{\text{тк}}(\tau), P_{\text{рд}}(\tau), P_{\text{ву}}(\tau), P_{\text{тс}}(\tau), P_{\text{сц}}(\tau)$ – функции вероятности безотказной работы узлов и подсистем верхнего уровня иерархии двигателя ГТД-350: турбины компрессора, редуктора двигателя, выходного устройства, топливной системы и системы смазки соответственно. Весовые коэффициенты других систем и узлов АД (компрессора, системы охлаждения, камеры сгорания, свободной турбины, входного устройства) равны нулю по причине отсутствия ресурсных отказов этих систем. Анализ уравнения (4) показывает, что влияние подсистем на надежность двигателя ГТД-350 различно. Наименее надежными элементами являются: турбина компрессора, редуктор и система смазки. Влиянием на надежность двигателя топливной системы и выходного устройства можно пренебречь, при этом точность анализа снизится примерно на 10 %.

Разложение функции надежности объекта по подсистемам является основой методического подхода по определению динамики проявления ресурсных отказов, вызванных различными группами причин, в зависимости от длительности наработки в нерасчетных условиях.

Для обработки результатов эксплуатации двигателя были разделены на группы в зависимости от величины межремонтного (до первого ремонта) ресурса: 1500, 1000, 750, 500, 375, 250 часов. Ввиду малого объема выборки двигателей с межремонтными ресурсами 375 и 250 часов, для этих групп прогнозирование остаточного ресурса не

производилось. В работе [2] с помощью критерия «хи-квадрат» Пирсона проведена проверка однородности данных об отказах для групп двигателей с межремонтными ресурсами 1500, 1000, 750 и 500 часов.

Результаты проверки показали [2], что с вероятностью не менее $\gamma = 0,95$ можно утверждать, что статистическая гипотеза об однородности выборки данных может быть принята для групп двигателей с межремонтным ресурсом 1500 часов, и с вероятностью $\gamma = 0,999$ – для групп двигателей с ресурсами 750 часов и 500 часов. Данные об отказах групп двигателей с межремонтным ресурсом 1000 часов рассматривать как однородные некорректно по причине недостаточного количества наблюдений изучаемого события (отказов, приводящих к досрочному снятию двигателя в ремонт).

Для групп двигателей с ресурсом 1500, 750 и 500 в работе [4] осуществлено прогнозирование величины γ -процентного ресурса. Пороговым значением вероятности безотказной работы была принята величина $P_{пор} = 0,9$. Полученные результаты (рисунок 12) свидетельствуют, что показатели надежности рассмотренных АД значительно ниже установленных.

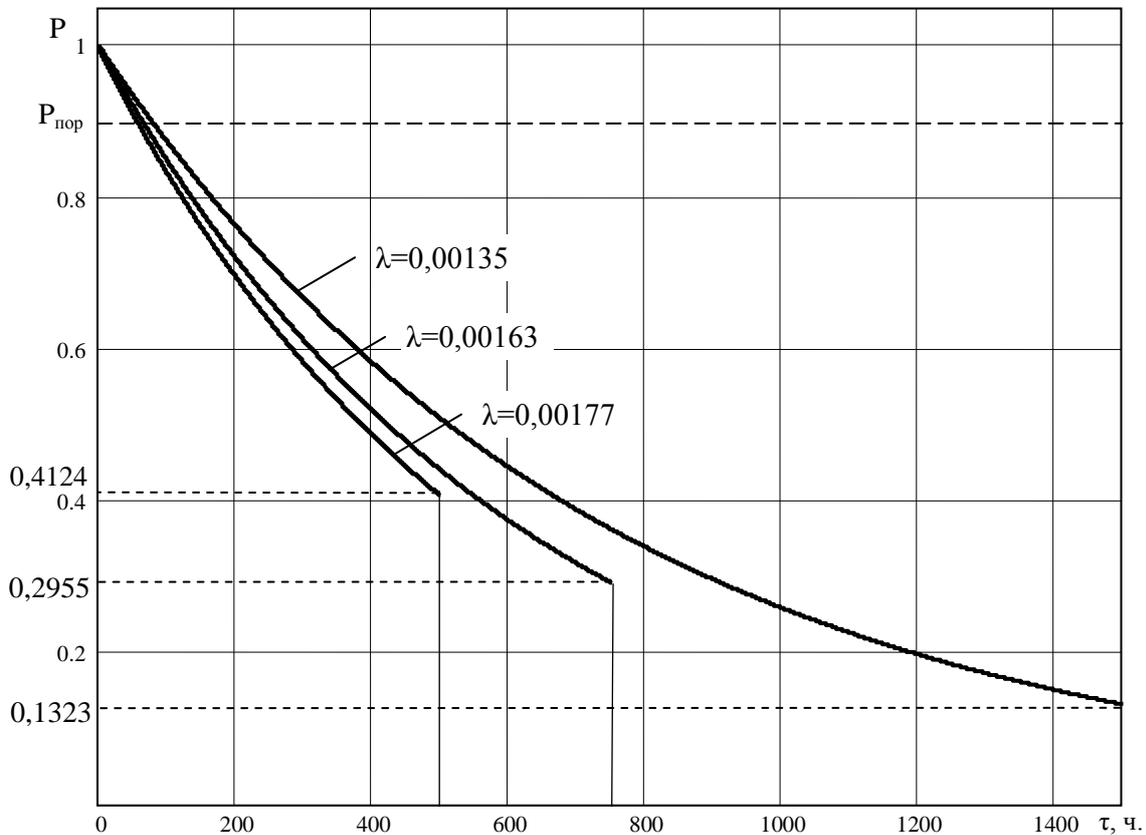


Рисунок 12 – Прогнозирование вероятности не снятия двигателей ГТД-350 досрочно в ремонт в зависимости от наработки и межремонтного ресурса

Вероятность того, что двигатели при достижении своего межремонтного ресурса не будут сняты с эксплуатации досрочно в ремонт, для двигателей с межремонтным ресурсом 1500, 750 и 500 часов составляет соответственно величину 0,1323, 0,2955, 0,4124.

На основании полученных значений интенсивности отказов λ для групп двигателей с межремонтными ресурсами 500, 750 и 1500 часов построена общая зависимость λ от величины межремонтного ресурса (рис. 13).

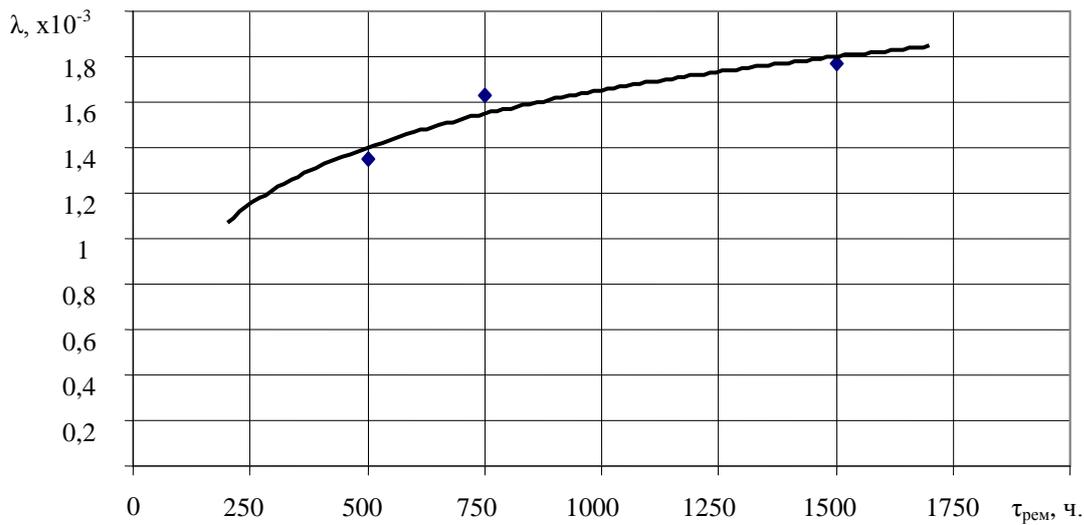


Рисунок 13 – Зависимость интенсивности отказов от величины межремонтного ресурса двигателя

Представленная на рисунке 13 зависимость позволяет оценить величину интенсивности отказов λ двигателей других групп межремонтного ресурса, для которых статистическое определение λ затруднено по причине недостаточного объема выборки исследуемых объектов.

Результаты исследования надежности вертолетных двигателей ГТД-350, эксплуатирующихся в условиях нетипичного эксплуатационного цикла, легли в основу отработки рекомендаций по коррекции сроков проведения и объема мероприятий технического обслуживания (рис. 14).

На рисунке 14 показано планирование капитальных ремонтов двигателей ГТД -350 при эксплуатации их в расчетных условиях при расчетном значении интенсивности отказов $\lambda_{\text{расчетн}}$, и в условиях нетипичного эксплуатационного цикла (показатель степени несоответствия $R=1,93-2,2$) при фактическом значении интенсивности отказов, приводящих к досрочному снятию АД в ремонт, равной $\lambda_{\text{факт}}$.

Для предотвращения появления ресурсных отказов для групп двигателей с межремонтными ресурсами 1500, 750, 500 часов величины межремонтного ресурса должны быть равными соответственно $T_{\text{тр.1500}} = 78$ часов, $T_{\text{тр.750}} = 65$ часов, $T_{\text{тр.500}} = 60$ часов. В этом случае показатель надежности двигателей не достигнет порогового уровня $R_{\text{пор}}=0,9$.

Классификация отказов вертолетных двигателей по подсистемам была использована ОАО «Мотор Сич» при обосновании продления ресурса и модернизации вертолетных двигателей ГТД-350.

Разработанный подход к прогнозированию остаточного ресурса вертолетных газотурбинных двигателей ГТД-350, эксплуатирующихся в нерасчетных условиях, применен для прогнозирования технического состояния вертолетных двигателей ТВ2-117 и ТВ3-117, установленных на вертолетах Ми-8 и Ми-8МТ (Ми-8МТВ), которые эксплуатируются на авиационной базе Внутренних войск МВД Украины.

Таким образом, разработанный подход к прогнозированию остаточного ресурса вертолетных двигателей, как сложных технических систем, является универсальным и может быть применен для других авиационных двигателей и других технических систем.

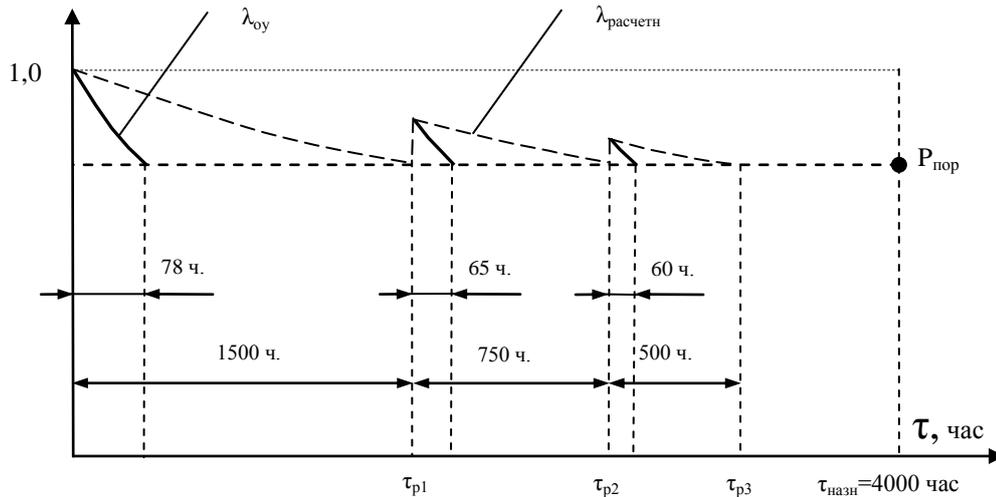


Рисунок 14 – Планирование капитальных ремонтов вертолетного двигателя ГТД-350 при показателе степени несоответствия эксплуатационного цикла $R=1,93-2,2$

Литература

1. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Прогнозирование остаточного ресурса объектов вооружения и военной техники в нерасчетных условиях эксплуатации // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. Харьков: НАКУ “ХАИ”. – 2008.
2. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Статистическая однородность выборки данных об отказах при эксплуатации вертолетных двигателей // Интегровані технології та енергозбереження. Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №3 – С. 37–41.
3. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Эксплуатационный цикл авиационного двигателя как критерий оценки его ресурса // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Харків: ХУ ПС. – 2006. – №2(8) – С. 4–6.
4. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Прогнозирование γ -процентного ресурса вертолетного двигателя на основании данных эксплуатации // Интегровані технології та енергозбереження. Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №2 – С. 89–96.
5. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Факторы, влияющие на надежность вертолетного двигателя ГТД-350, как сложной технической системы // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Харків: ХУ ПС. – 2005. – №5 – С. 26–29.
6. Курс учебно-лётной подготовки на учебном вертолете Ми-2 (КУЛП-УВ-95г). – Харьков: ХИЛ, 1995. – 104 с.
7. Анипко О.Б., Мясягин В.И. Прогнозирование состояния ЛА как сложной технической системы для обоснования мероприятий по продлению ресурса или модернизации // Збірник наукових праць ХІ ВПС. – Харків: ХІ ВПС. – 2004. – №1 – С. 181–186.

УДК 629.735.45.036.

Аніпко О.Б., Іленко Є.Ю.

ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ВЕРТОЛІТНИХ ДВИГУНІВ У НЕРОЗРАХОВАНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Розроблена модель експлуатації вертолітних двигунів на основі зміни ймовірності безвідмовної роботи об'єкту від часу напрацювання. Модель використана для обґрунтування рекомендацій щодо корекції термінів проведення та обсягу заходів технічного обслуговування вертолітних двигунів ГТД-350, що експлуатуються в умовах нетипового експлуатаційного циклу. Показана можливість використання моделі для оцінки залишкового ресурсу інших авіаційних двигунів та технічних систем.