

УДК 621.532

Анипко О.Б., Иленко Е.Ю.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ γ -ПРОЦЕНТНОГО РЕСУРСА ВЕРТОЛЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба

В настоящее время авиационная техника Воздушных Сил Украины эксплуатируется таким образом, что значительная часть срока службы связана с пребыванием летательных аппаратов (ЛА) на хранении или их простоем в отсутствие полетов. Эти обстоятельства приводят к изменениям в общей структуре жизненного цикла ЛА, поэтому актуальной становится задача оценки влияния особенностей эксплуатации на характеристики ЛА. Одним из элементов, наиболее чувствительным к особенностям эксплуатации, является силовая установка. Показатели надежности авиационных двигателей (АД), при эксплуатации их в условиях отличия эксплуатационного цикла от типичного, могут не соответствовать установленным.

Силовая установка является одной из главных составных частей пилотируемого летательного аппарата, определяющих его боевую эффективность и безопасность полета. Надежность авиационного двигателя (в широком понимании включающая безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость), как свойство, обеспечивающее его работоспособность, относится к основным параметрам двигателя [1]. Значение гамма ресурса авиационного двигателя устанавливается близким к 100 %.

Гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах [2]. Достоинством этого показателя является возможность его определения до завершения испытаний всех образцов. В технике в большинстве случаев для различных элементов применяют ресурс от 90 % до 99,5 %. Если отказ влияет на безопасность, то гамма ресурс приближается к 100 % [3].

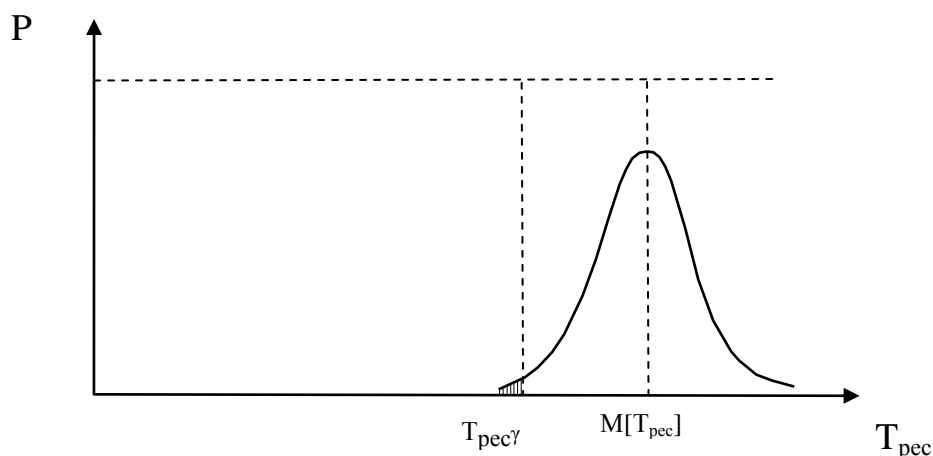


Рисунок 1 – Определение гамма ресурса технической системы

Вероятность обеспечения ресурса $T_{рес\gamma}$, соответствующая значению $\gamma/100$, определяется по формуле:

$$P(T_{\text{дв}}) = \int_{T_{\text{дв}}}^{\infty} P(T_{\text{дв}}) dT_{\text{дв}} = \gamma / 100, \quad (1)$$

где $T_{\text{рес}} - \gamma$ – наработка до предельного состояния (ресурса).

На рисунке 1 $M[T_{\text{рес}}]$ – математическое ожидание ресурса объектов, испытания которых проводились в одинаковых условиях.

Факт досрочного снятия авиационного двигателя в ремонт свидетельствует об отказе и, возможно, достижении двигателем предельного состояния. Поэтому отказы, которые приводят к досрочному снятию двигателя в ремонт, классифицируются как ресурсные.

Одним из показателей эксплуатационной надежности двигателей является величина наработки, приходящейся на одну неисправность, приведшую к досрочному съему двигателя в ремонт.

Возникновение отказов АД, приводящих к досрочному снятию двигателей в ремонт, в реальном времени наработки представляет собой случайный поток событий, удовлетворяющий свойствам ординарности, стационарности и отсутствия последствия, что дает основания считать его простейшим.

Интервал времени T между двумя соседними событиями в простейшем потоке имеет показательное распределение с параметром, равным интенсивности потока отказов λ . Физический смысл величины λ – среднее число отказов в единицу времени. Плотность распределения случайной величины времени безотказной работы АД определяется зависимостью:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Откуда функция распределения имеет вид:

$$F(t) = P\{T < t\} = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Интерпретация представленного выражения (3) заключается в следующем: для того, чтобы выполнялось неравенство $T < t$, нужно чтобы хотя бы одно событие потока попало на участок длины t [4].

Вероятность безотказной работы $P(t)$ является функцией наработки объекта и в интервале времени от 0 до t определяется как

$$P(t) = P\{T > t\}. \quad (4)$$

Если состояние объекта характеризуется набором параметров с допустимой по условиям работоспособности областью значений этих параметров, то вероятность безотказной работы определяется как вероятность того, что за рассматриваемое время каждый из параметров не выйдет за свои предельные значения [5].

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с функцией распределения $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$ наработки до отказа:

$$F(t) = 1 - P(t); \quad (5)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (6)$$

За период эксплуатации с 1995 по 2005 год в Харьковском университете Воздушных Сил обобщен материал по отказам и неисправностям вертолетных двигателей

ГТД-350. Зафиксировано 35 случаев отказа АД ГТД-350, которые привели к досрочному снятию двигателей в ремонт [6].

За этот период в эксплуатации находились 177 двигателей ГТД-350, имеющих разные значения межремонтного (доремонтного) ресурса и проработавших различное количество часов в условиях летной учебной части.

Значения ресурса относятся к показателям надежности и являются технико-эксплуатационными характеристиками. Однако при их назначении принимают во внимание прогнозируемые значения показателей надежности. Если установлено требование безопасности, то назначаемый ресурс должен соответствовать значению вероятности безотказной работы по отношению к критическим отказам, близким к единице [5].

Данные о двигателях ГТД-350, имеющих различное значение межремонтного ресурса, приведены в таблице 1. В качестве критерия отказа рассматриваемых АД принимается факт досрочного снятия двигателя в ремонт. Соответственно под вероятностью безотказной работы за время t рассматривается вероятность того, что двигатель за это время не будет снят с эксплуатации досрочно.

Суммарная наработка двигателей τ_{Σ} за рассматриваемый период составила 35633 часа.

Выработка ресурса каждым двигателем происходила неодинаково. Для последующей оценки значения израсходованного ресурса для каждой группы двигателей введем коэффициент выработки ресурса $K_{вр}$, равного отношению суммарной наработки двигателей группы к их общему располагаемому ресурсу. Значение коэффициента выработки ресурса, выраженное в процентах, определяется по формуле:

$$K_{\text{вд}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_{\text{двд}i}} \cdot 100. \quad (7)$$

Статистическая оценка средней наработки на одно досрочное снятие АД в ремонт для двигателей каждой группы находится из:

$$T_{\text{двд}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{r(t)}, \quad (8)$$

где T_i – наработка каждого двигателя группы; $r(t)$ – количество отказов за время t наработки, которые приводили к досрочному снятию двигателей в ремонт.

За рассматриваемый период времени математическое ожидание значения наработки среди наблюдаемых двигателей ГТД-350 каждой группы определяется следующим образом:

$$M[T] = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (9)$$

где N – количество двигателей в рассматриваемой группе.

Значения $K_{вр}$, $T_{дсд}$, $M[T]$ для каждой группы двигателей, вычисленные по формулам (7), (8), (9), представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные о двигателях ГТД-350, находившихся в эксплуатации с 1995 по 2006 год

| № п/п | Значение межремонтного ресурса, $T_{рем}$, час | Количество двигателей ГТД-350, N, шт. | Доля АД с указанным ресурсом от их общего количества, % | Общая наработка $\sum T_i$, час | Средняя наработка двигателя, M[T], час | Кол-во досрочных снятий АД, n(t) | Наработка на досрочное снятие АД, час | Коэффициент использования ресурса, % |
|-------|---|---------------------------------------|---|----------------------------------|--|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. | 1500 | 68 | 38,4 % | 13527 | 198,9 | 16 | 845,4 | 13,3 |
| 2. | 1000 | 24 | 13,6 % | 8531 | 355,5 | 1 | 8531 | 35,5 |
| 3. | 750 | 33 | 18,6 % | 5636 | 170,8 | 8 | 704,5 | 22,8 |
| 4. | 500 | 43 | 24,3 % | 6425 | 149,4 | 10 | 642,5 | 29,9 |
| 5. | 375 | 1 | 0,6 % | 310 | 310 | - | - | 82,7 |
| 6. | 250 | 8 | 4,5 % | 1204 | 150,5 | - | - | 60,2 |
| | Всего: | 177 | | 35633 | | 35 | | |

По данным эксплуатации для каждой группы двигателей находим точечную статистическую оценку вероятности того, что двигатели не будут досрочно сняты с эксплуатации в ремонт в интервале времени от $t_0 = 0$ до $t = M[t]$

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}, \tag{10}$$

где $n(t)$ – число АД в группе, досрочно снятых за время от t_0 до t .

Далее представляется возможным построить кривую вероятности безотказной работы для каждой группы двигателей по конкретному значению параметра экспоненциальной модели, спрогнозировать значение γ -процентного ресурса при наработке $T_{рем}$ в условиях учебной летной части и сравнить его с расчетным. Интенсивность потока отказов λ , как параметр функции распределения времени безотказной работы АД, определяется из (3), (5) как:

$$\lambda = - \frac{\ln P(t)}{t}. \tag{11}$$

В выражении (11) значение $P(t)$ – точечная статистическая оценка вероятности безотказной работы двигателя в интервале времени от $t_0 = 0$ до $t = M[t]$.

Прогнозируемое значение γ -ресурса для каждой группы двигателей находится как вероятность их безотказной работы в течение времени, равного соответствующему межремонтному ресурсу, выраженному в процентах:

$$\gamma = P(t = T_{\delta\alpha i}) \cdot 100 = 100 \cdot e^{-\lambda T_{\delta\alpha i}}. \tag{12}$$

Полученные расчетные данные, необходимые для построения кривых вероятности безотказной работы для каждой группы двигателей представлены в таблице 2. Ввиду малой выборки двигателей с межремонтными ресурсами 250 часов и 375 часов, для этих групп прогнозирование значения γ -процентного ресурса не проводится.

Таблица 2 – Расчетные данные оценки прогнозируемого значения γ -ресурса

| № п\п | Значение межремонтного (доремонтного) ресурса, $T_{рем}$, час | Статистическая оценка вероятности безотказной работы, $P(t)$ | Параметр экспоненциальной модели, λ | Прогнозируемое значение γ -ресурса, % |
|-------|--|--|---|--|
| 1. | 1500 | 0,765 | 0,00135 | 13,23 |
| 2. | 1000 | 0,958 | 0,00012 | 88,72 |
| 3. | 750 | 0,758 | 0,00163 | 29,55 |
| 4. | 500 | 0,767 | 0,00177 | 41,24 |

На рисунках 2–5 представлены экспоненциальные модели надежности рассматриваемых групп двигателей. Пороговым значением вероятности безотказной работы принимаем величину $P_{пор} = 0,9$.

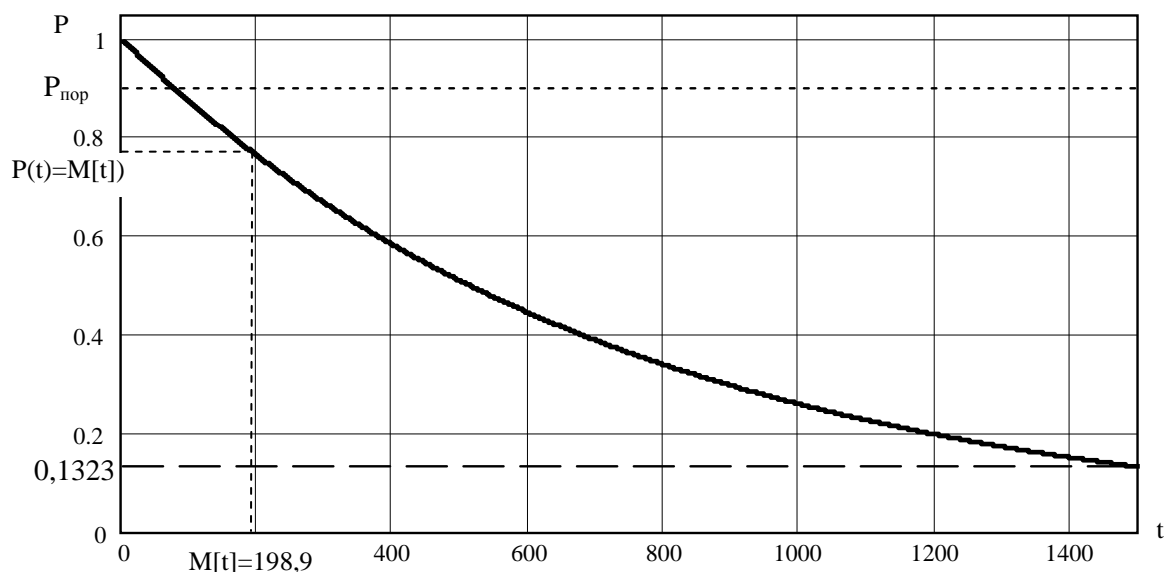


Рисунок 2 – Экспоненциальная модель вероятности неснятия АД досрочно в ремонт для группы двигателей с $T_{рем}=1500$ часов

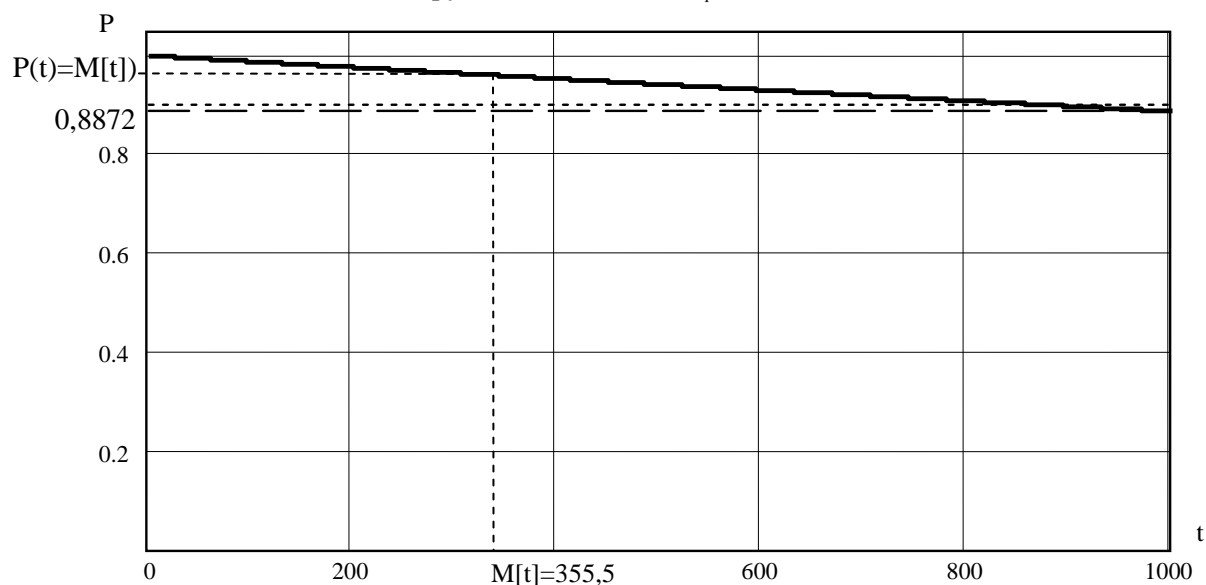


Рисунок 3 – Экспоненциальная модель вероятности неснятия АД досрочно в ремонт для группы двигателей с $T_{рем}=1000$ часов

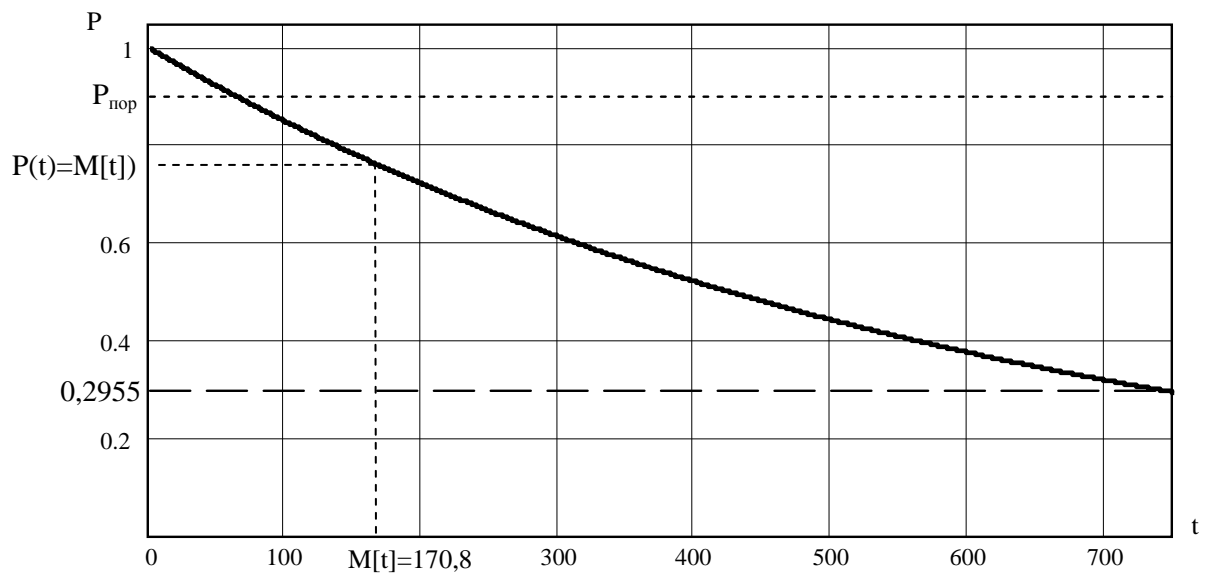


Рисунок 4 – Экспоненциальная модель вероятности неснятия АД досрочно в ремонт для группы двигателей с $T_{\text{рем}}=750$ часов

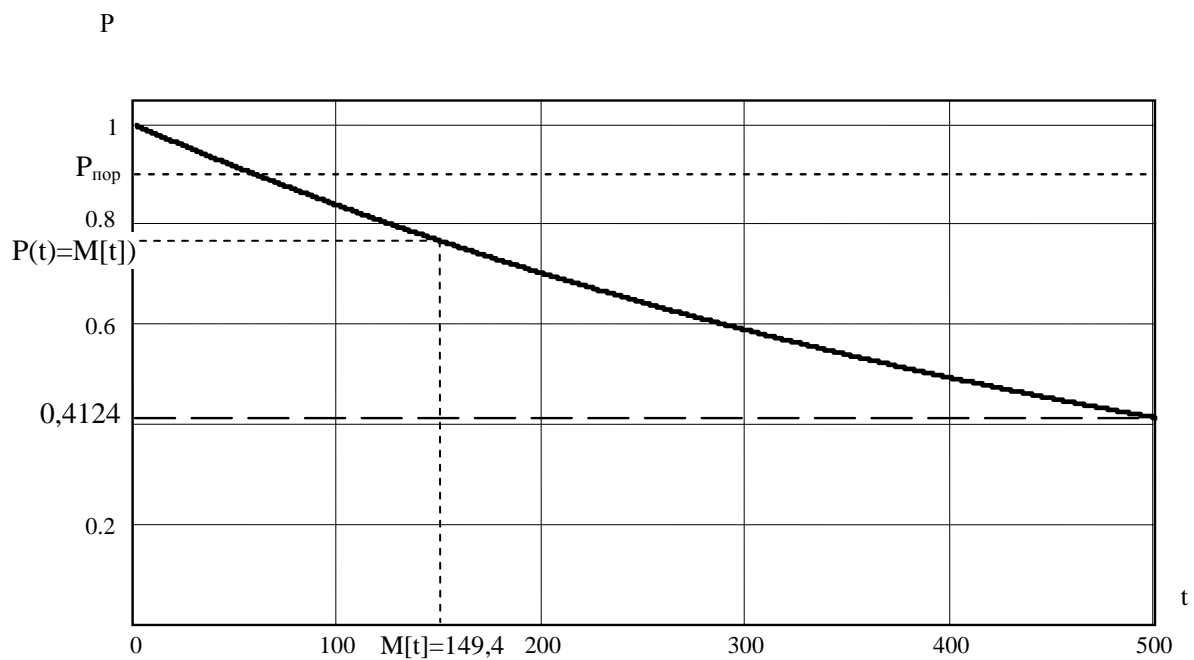


Рисунок 5 – Экспоненциальная модель вероятности неснятия АД досрочно в ремонт для группы двигателей с $T_{\text{рем}}=500$ часов

На рисунке 6 представлены линии прогнозируемого значения вероятности досрочного неснятия в ремонт всех групп двигателей.

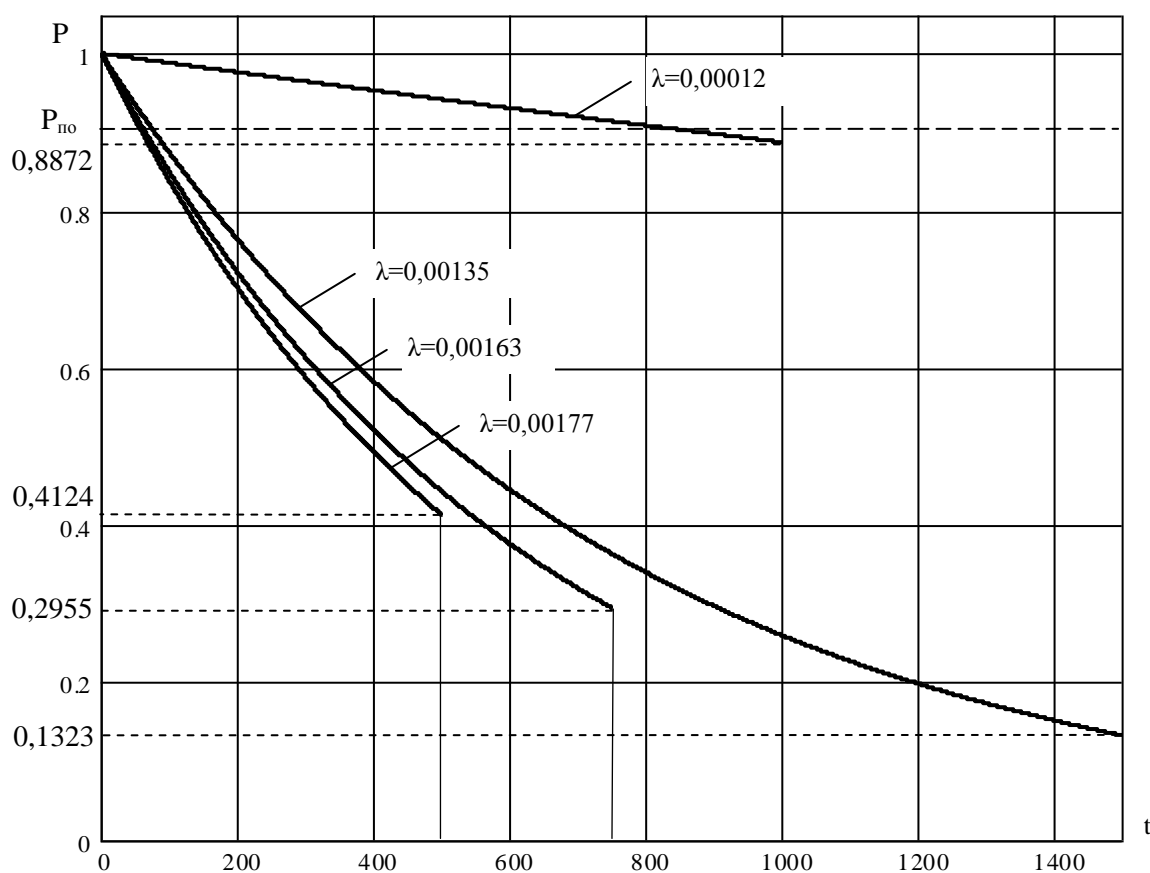


Рисунок 6 – Прогнозирование вероятности неснятия двигателей ГТД-350 досрочно в ремонт в зависимости от наработки и межремонтного ресурса

Значение параметра экспоненциальной модели λ является функцией условий эксплуатации. Работа рассматриваемых двигателей происходила в однородных условиях, главной особенностью которых являются характеристика эксплуатационного цикла [7] и интенсивность эксплуатации. Указанные факторы с точки зрения воздействия на надежность двигателя можно свести к:

- средней продолжительности эксплуатационного цикла $\tau_{п}$;
- средней относительной величине использования максимальных режимов за ресурс ρ_p ;
- значению коэффициента технического использования $K_{ти}$.

Для выявления зависимости $\lambda=f(\tau_{п}, \rho_p, K_{ти})$ представляется целесообразным в дальнейшем разделить рассматриваемые АД на группы в зависимости от значений (диапазонов значений) каждого из названных параметров в отдельности с целью последующего анализа их влияния на показатель экспоненциальной модели λ на основании данных эксплуатации.

Полученные результаты свидетельствуют, что показатели надежности рассмотренных АД значительно ниже установленных. Вероятность того, что двигатели при достижении своего межремонтного ресурса не будут сняты с эксплуатации досрочно в ремонт, для большинства АД не превышает 0,5. Вышесказанное может быть использо-

вано для принятия обоснованных решений о внесении изменений в мероприятия технического обслуживания вертолетных двигателей с учетом конкретных условий их эксплуатации.

Литература

1. Алексеев К.П. Надёжность и технико-экономические характеристики авиационных двигателей. – М.: Транспорт, 1980. – 102 с.
2. ГОСТ 27002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
3. Труханов В.М. Надёжность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов. – М.: Машиностроение, 2003. 320 с.
4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятности и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
5. Ланецкий Б.Н. Основы теории надёжности, эксплуатации и ремонта радиоэлектронной аппаратуры зенитных ракетных систем. – Харьков: ХВУ, 1998. – 400 с.
6. Відомості по двигунам, що достроково зняті з експлуатації в частинах ХІ ВПС (ХІЛ ВПС, НАК ВПС) ЗСУ за півріччя з 1995 по 2005 рік.
7. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Эксплуатационный цикл авиационного двигателя как критерий оценки его ресурса. Збірник наукових праць ХУ ПС. – Харків: ХУ ПС. – 2006. – Вип.№2(8). – с. 4–6.

УДК 621.532

Аніпко О.Б., Іленко Є.Ю.

**ПРОГНОЗУВАННЯ γ -ВІДСОТКОВОГО РЕСУРСУ ВЕРТОЛІТНОГО ДВИГУНА
НА ПІДСТАВІ ДАНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Запропоновано метод оцінки γ -відсоткового ресурсу вертолітного двигуна з урахуванням особливостей експлуатації