

використовувати для виявлення, ідентифікації та локалізації НРС у нелінійній радіолокації. Підвищення ефективності використання НР досягається за рахунок зведення до мінімуму значущостей впливу таких факторів як: присутність у досліджуваному середовищі заводових МОМ-структур; суб'єктивність оператора; присутність паразитних пелюсток діаграми направленості випромінюючої антени (за рахунок обмеження рівня потужності ЗС НР).

Література: 1. Хорошко В. А. Методы и средства защиты информации / В. А. Хорошко, А. А. Чекатков – К. : «Юниор», 2003. – 504 с. 2. Патент України на корисну модель UA 71286 U, G01S 13/00, G01S 13/75, G01S 7/292, G08B 13/24. Спосіб селекції нелінійних розсіювачів за рівнем однієї гармоніки / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський, М. І. Прокоф'єв. – № u201115179; Заявл. 21.12.2011; Опубл. 10.07.2012. – Бюл. № 13/2012. 3. Патент України на корисну модель UA 71287 U, G01S 13/00, G01S 13/75, G01S 7/292, G08B 13/24. Спосіб селекції нелінійних розсіювачів за інертністю процесів спотворення вольт-амперних характеристик напівпровідників / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський, М. І. Прокоф'єв. – № u201115182; Заявл. 21.12.2011; Опубл. 10.07.2012. – Бюл. № 13/2012. 4. Патент України на корисну модель UA 71285 U, G01S 13/00, G01S 13/75, G01S 7/292, G08B 13/24. Спосіб виявлення та розпізнавання нелінійних розсіювачів як випадкових генераторів хаотичних коливань / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський, М. І. Прокоф'єв. – № u201115177; Заявл. 21.12.2011; Опубл. 10.07.2012. – Бюл. № 13/2012. 5. Пат. Российской Федерации RU 2291462 C2, МПК G 01 S 13/04. Система обнаружения и распознавания объектов, включающих элементы с нелинейными вольт-амперными характеристиками / В. Н. Ткач, Д. В. Ткачев, С. Ю. Акимкин. – № 2004134546/09; Заявл. 26.11.2004; Опубл. 12.05.2009. 6. Пат. Российской Федерации RU 2382380 C1, МПК G 01 S 13/00. Способ нелинейной радиолокации / В. П. Лихачев, Н. А. Усов. – № 2008131114/09; Заявл. 28.07.2008; Опубл. 20.02.2010. 7. Кувьлин А. И. Нелинейные рассеиватели и описание их поляризационных характеристик / А. И. Кувьлин, М. Г. Визер // Теория и практика применения и совершенствования радиоэлектронных систем ГА : сборник научных трудов. – М. : МИИГА, 1985. – С. 102. 8. Ларцов С. В. Методы экспериментального исследования поляризационных свойств нелинейных рассеивателей / С. В. Ларцов // Вестник Верхне-волжского отделения академии технологических наук Р.Ф., серия «Высокие технологии в военном деле», часть 1. – Н. Новгород. : НВЗРКУ, 1998. – С. 68-71. 9. Васенков А. А. Дистанционное нелинейное зондирование объектов электромагнитными волнами при наличии границ раздела сред [Текст] : дис. ... к.т.н. : 05.12.04 / Васенков Алексей Андреевич. – Н. Новгород, 2003. – 131 с. 10. Зінченко М. В. Значущість рівня потужності зондуємого сигналу в нелінійній радіолокації / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський, М. І. Прокоф'єв // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. Наково-технічний збірник. НТУУ «КПІ» – 2010. – Вип. 1 (20). – С. 102-113. 11. Влияние саморазогрева на динамику колебательных процессов в диодах Ганна / А. В. Бабаян, Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль // V Международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур ХАОС-98»: 6-10 октября 1998 г.: тез. докл. – Саратов: Изд. ГосУНЦ «Колледж», 1998. – С. 107-108. 12. Усанов Д. А. Влияние саморазогрева диодов Ганна на спектр выходного сигнала генераторов на их основе / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, А. В. Бабаян // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 1998. – Т. 6, №6. – С. 20-28. 13. Ridley B. K. The possibility of negative resistance in semiconductors / B. K. Ridley, T. B. Watkins // Proc. Phys. Soc. London. – 1961. – V. 78. – P. 293-304. 14. Hilsum C. Transferred electron amplifiers and oscillators. / C. Hilsum // Proc IRE. – 1962. – V. 50. – P. 185-189. 15. Deau M. Transferred-electron oscillators / M. Deau, M. Howes, J. Daud // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. – 1973. – V. 21. – № 3. – P. 124. 16. Jettava C. P. An analytical equivalent circuit representation for waveguide-mounted Gunn oscillators / C. P. Jettava, L. Robert, L. Yunshor // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. – 1972. – V. 20. – № 9. – P. 73.

УДК 623.486

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ С ВРЕМЕННЫМ РЕЗЕРВОМ ПРИ ИЗВЕСТНЫХ НАЧАЛЬНЫХ МОМЕНТАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА

*Дмитрий Могилевич, Борис Креденцер, *Виктор Вишневский*
ВИТИ НТУУ „КПІ”, ВИКНУ

Анотація: Об'єктом дослідження є системи безперервного використання з тимчасовим резервом в

умовах обмеженої інформації про функції розподілу напрацювання об'єкта до відмови, що включає в себе об'єкт і резерв часу, що поповнюється, для яких отримано нові розрахункові співвідношення для оцінки граничних значень коефіцієнта простою, коефіцієнта технічного використання і середніх питомих витрат, які характеризують якість технічного обслуговування.

Summary: The object of investigation of the continuous use of the temporary reserve includes facilities and replenish reserve time, for which the new settlement ratio for the boundary values of the coefficient estimates downtime, technical utilization ratio and average unit costs, characterize the quality of service in conditions of limited information on distribution function of the operating time of the object in advance.

Ключевые слова: Системы непрерывного использования с временным резервом, техническое обслуживание, коэффициент простоя, средние удельные затраты.

I Введение

Учёт априорной неопределённости при исследовании надёжности и технического обслуживания систем различного целевого назначения представляет собой актуальную и достаточно сложную проблему, на решение которой направлены усилия многих специалистов. В частности, в [1] рассмотрена система с временным резервированием (объект + резерв времени) и получены формулы для оценки минимаксных (гарантированных) значений функционалов, характеризующих качество технического обслуживания (коэффициента технического использования, коэффициента простоя и средних удельных затрат) для случая, когда информация о функции распределения наработки объекта до отказа $F(x)$ ограничена знанием только лишь двух начальных моментов S_1 и S_2 . Показано, что формулы для коэффициента простоя и средних удельных затрат имеют одинаковый вид и различаются только значениями коэффициентов. Поэтому авторами исследован функционал вида:

$$K(F, T) = \frac{\alpha_1 F(T) + \alpha_2 \bar{F}(T)}{\int_0^T \bar{F}(t) dt + m_1 F(T) + m_2 \bar{F}(T)}, \quad (1)$$

где T – периодичность проведения технического обслуживания (детерминированная величина), $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$.

В этот функционал входят неизвестные коэффициенты $(\alpha_1, \alpha_2, m_1, m_2)$, значения которых зависят от режима использования системы (непрерывное или эпизодическое использование), от вида функций распределения времени восстановления объекта $F_B(x)$ и продолжительности технического обслуживания $F_{TO}(x)$, а также от используемого в системе временного резерва.

В результате проведенного исследования получено уравнение для определения оптимальной периодичности обслуживания T^* , которое имеет следующий вид:

$$\sigma^2 s_1 [s_1(1+b) - 2m] + \sigma^4 + bs_1^4 = V(T) \quad (2)$$

где

$$V(T) = 2[2bs_1^3 + \sigma^2(2s_1 - s)]T - [\sigma^2(3-b) + 6bs_1^2]T^2 + 4bs_1T^3 - bT^4; \quad (3)$$

$$\sigma^2 = s_2 - s_1^2; \quad b = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}; \quad m = m_2 - bm_1.$$

Приведена формула для расчёта точных нижних границ коэффициента простоя $K_n(F, T^*)$ и средних удельных затрат $\bar{C}(F, T^*)$:

$$K(F, T^*) = \frac{2\alpha_1 b(s_1 - T^*)}{2m_2(s_1 - T^*) + T^*(4s_1 - 3T^*) - s_2}. \quad (4)$$

При расчётах значений $K_n(F, T^*)$ и $\bar{C}(F, T^*)$ в эту формулу следует подставлять различающиеся между собой коэффициенты α_1, b, m_2 .

С помощью выражения (4) нетрудно определить точную верхнюю границу коэффициента технического использования $K_{\text{ти}}(F, T^*)$:

$$K_{\text{ти}}(F, T^*) = 1 - K_{\text{п}}(F, T^*) = 1 - \frac{2\alpha_1 b(s_1 - T^*)}{2m_2(s_1 - T^*) + T^*(4s_1 - 3T^*) - s_2}. \quad (5)$$

Практическое использование приведенных выше формул для оценки граничных значений показателей качества технического обслуживания конкретной системы (в данной статье – системы непрерывного использования) возможно лишь в том случае, если удастся выразить значения неизвестных коэффициентов α_1 , α_2 , m_1 , m_2 , m , b через исходные параметры рассматриваемой системы. Решению этой задачи и посвящена данная статья, которая является продолжением работы [1].

II Постановка задачи

Рассмотрим систему непрерывного использования с временным резервированием, включающую в себя объект и пополняемый резерв времени [1]. Предположим, что возникающие в объекте отказы проявляются мгновенно, а для их предупреждения и устранения предусмотрено проведение двух видов восстановительных работ: периодического технического обслуживания, в основу которого положено проведение планово-предупредительных профилактик, и внеплановых аварийно-профилактических ремонтов. Предусмотренный в системе пополняемый резерв времени расходуется при выполнении этих восстановительных работ.

Установим следующую очередность выполнения восстановительных работ. Пусть в момент начала функционирования ($t=0$) планируется проведение технического обслуживания через неслучайное (детерминированное) время T , определяющее периодичность обслуживания. Если до назначенного времени объект не отказал ($t_0 > T$, где t_0 – наработка объекта до отказа), то в этот момент начинается обслуживание, продолжительность которого $t_{\text{то}}$ – случайная величина с произвольной функцией распределения $F_{\text{то}}(x)$ и конечным математическим ожиданием $\bar{t}_{\text{то}}$. Если отказ объекта возник раньше (то есть $t_0 < T$), то он выявляется мгновенно и сразу же начинается восстановление работоспособности объекта. Время восстановления – случайная величина $t_{\text{в}}$ с произвольной функцией распределения $F_{\text{в}}(x)$ и конечным математическим ожиданием $\bar{t}_{\text{в}}$ (при этом $\bar{t}_{\text{в}} > \bar{t}_{\text{то}}$). Если обслуживание (или восстановление) объекта выполняется за допустимое время $t_{\text{д1}}$ (или $t_{\text{д}}$), определяющее используемый в системе резерв времени, то оно относится к полезному времени, в противном случае (при $t_{\text{то}} > t_{\text{д1}}$ или $t_{\text{в}} > t_{\text{д}}$) – к простоям системы. Резервное время может быть случайной величиной $\tau_{\text{д}}$ с функцией распределения $D(t) = P\{\tau_{\text{д}} < t\}$ или детерминированной величиной $\tau_{\text{д}} = \text{const}$ (это резервное время используется при восстановлении объекта). При выполнении технического обслуживания предусмотрен резерв времени $\tau_{\text{д1}}$ с функцией распределения $D_1(t) = P\{\tau_{\text{д1}} < t\}$ или $\tau_{\text{д1}} = \text{const}$.

После выполнения каждой из указанных выше восстановительных работ система (объект + резерв времени) полностью обновляется, в момент их окончания очередное техническое обслуживание перепланируется и далее весь процесс обслуживания и ремонта повторяется.

Качество технического обслуживания и ремонта рассматриваемой системы оценивается с помощью трех показателей: комплексного показателя надежности – коэффициента технического использования $K_{\text{ти}}(T)$, коэффициента простоя $K_{\text{п}}(T)$ и стоимостного показателя – средних удельных затрат $\bar{C}(T)$, то есть затрат, приходящихся на единицу времени пребывания системы в подмножестве работоспособных состояний.

Требуется получить расчётные соотношения, устанавливающие связь между неизвестными коэффициентами, входящими в формулы (1) – (4), и исходными параметрами рассматриваемой системы непрерывного использования с временным резервом, и изложить методику определения точных граничных значений указанных выше показателей качества технического обслуживания.

III Получение расчётных состояний

Для решения задачи вначале получим формулы для показателей качества технического обслуживания при полной исходной информации, когда функции распределения $F(x)$, $F_B(x)$ и $F_{T_0}(x)$ известны (или заданы). Функционирование системы может быть описано случайным процессом $x(t)$, который характеризует состояние системы в произвольный момент времени t и принимает следующие значения:

$$x(t) = \begin{cases} e_0, & \text{если в момент } t \text{ объект работоспособен;} \\ e_1, & \text{если в момент } t \text{ проводится восстановление работоспособности объекта за допустимое время } t_d; \\ e_2, & \text{если в момент } t \text{ проводится техническое обслуживание за допустимое время } t_{д1}; \\ e_3, & \text{если в момент } t \text{ проводится обслуживание после израсходования резерва времени } t_{д1}; \\ e_4, & \text{если в момент } t \text{ проводится восстановление работоспособности после израсходования резерва времени } t_d. \end{cases}$$

Граф состояний и переходов процесса $x(t)$ приведен на рис. 1, где $E_+ = \{e_0, e_1, e_2\}$ и $E_- = \{e_3, e_4\}$ – подмножества соответственно работоспособных и неработоспособных состояний системы с резервом времени, причём $E = E_+ \cup E_-$.

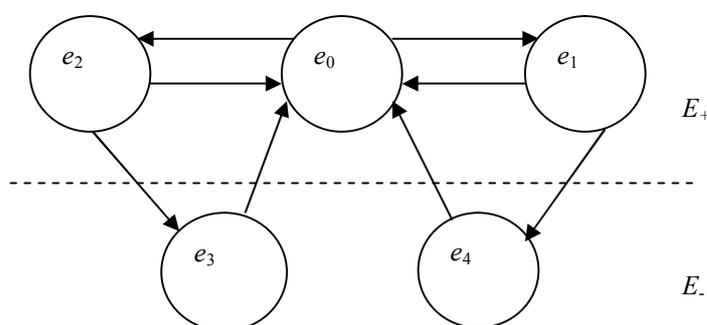


Рисунок 1 – Граф состояния и переходов случайного процесса $x(t)$, описывающего функционирование системы непрерывного использования с временным резервированием

Нетрудно видеть, что определенный таким образом случайный процесс $x(t)$ является регенерирующим, причём моментами регенерации являются моменты перехода в состояние e_0 . В предположении, что продолжительность технического обслуживания $t_{т0}$ и время восстановления $t_в$ – непрерывные случайные величины, процесс $x(t)$ является и аперiodическим.

В этом случае формула для коэффициента технического использования системы может быть представлена в следующем виде:

$$K_{\text{ти}}(T) = \frac{\sum_{e_i \in E_+} M X^{(i)}}{M \tilde{X}}, \quad (6)$$

где $E_+ = \{e_0, e_1, e_2\}$ – подмножество работоспособных состояний системы; $MX^{(i)}$ – среднее время пребывания системы в состоянии $e_i, i = 0, 1, 2$; $M\tilde{X}$ – средняя продолжительность периода регенерации.

Значения $MX^{(0)}, MX^{(1)}, MX^{(2)}$ и $M\tilde{X}$ могут быть рассчитаны по формулам [2]:

$$MX^{(0)} = \int_0^{\infty} \bar{F}(t) dt; \quad MX^{(1)} = M_B F(T); \quad MX^{(2)} = M_{T_0} \bar{F}(T);$$

$$M\tilde{X} = \int_0^{\infty} \bar{F}(t) dt + \bar{t}_B F(T) + \bar{t}_{T_0} \bar{F}(T).$$

Подставляя эти выражения в формулу (6), получаем

$$K_{\text{гн}}(T) = \frac{\int_0^T \bar{F}(t) dt + M_B F(T) + M_{T_0} \bar{F}(T)}{\int_0^T \bar{F}(t) dt + \bar{t}_B F(T) + \bar{t}_{T_0} \bar{F}(T)}, \quad (7)$$

где

$$M_B = \int_0^{\infty} \bar{F}_B(t) \bar{D}(t) dt, \quad (8)$$

$$M_{T_0} = \int_0^{\infty} \bar{F}_{T_0}(t) \bar{D}_1(t) dt, \quad (9)$$

если резервы времени τ_d и τ_{d1} – случайные величины с функциями распределения соответственно $D(t)$ и $D_1(t)$;

$$M_B = \int_0^{t_d} \bar{F}_B(t) dt, \quad (10)$$

$$M_{T_0} = \int_0^{t_{d1}} \bar{F}_{T_0}(t) dt, \quad (11)$$

если резервы времени t_d и t_{d1} – детерминированные величины; $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$; $\bar{F}_B(t) = 1 - F_B(t)$; $\bar{F}_{T_0}(t) = 1 - F_{T_0}(t)$; $\bar{D}(t) = 1 - D(t)$; $\bar{D}_1(t) = 1 - D_1(t)$;

Формулы для коэффициента простоя $K_{\text{п}}(T)$ и средних удельных затрат $\bar{C}(T)$ имеют следующий вид:

$$K_{\text{п}}(T) = 1 - K_{\text{гн}}(T) = \frac{(\bar{t}_B - M_B)F(T) + (\bar{t}_{T_0} - M_{T_0})\bar{F}(T)}{\int_0^T \bar{F}(t) dt + \bar{t}_B F(T) + \bar{t}_{T_0} \bar{F}(T)}, \quad (12)$$

$$\bar{C}(T) = \frac{c_B \bar{t}_B F(T) + c_{T_0} \bar{t}_{T_0} \bar{F}(T)}{\int_0^T \bar{F}(t) dt + M_B F(T) + M_{T_0} \bar{F}(T)}, \quad (13)$$

где c_B, c_{T_0} – средние затраты за единицу времени при выполнении соответственно восстановления и технического обслуживания объекта.

Нетрудно видеть, что формулы (12) и (13) имеют одинаковый вид и различаются только коэффициентами при $F(T)$ и $\bar{F}(T)$. Приравнивая эти коэффициенты соответствующим коэффициентам формулы (1), устанавливаем связь между коэффициентами $\alpha_1, \alpha_2, m_1, m_2$ и параметрами рассматриваемой системы:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \bar{t}_B - M_B, \\ \alpha_2 &= \bar{t}_{TO} - M_{TO}, \\ m_1 &= \bar{t}_B, \\ m_2 &= \bar{t}_{TO}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= c_B \bar{t}_B, \\ \alpha_2 &= c_{TO} \bar{t}_{TO}, \\ m_1 &= M_B, \\ m_2 &= M_{TO}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Параметры (14) используются при расчёте по формуле (4) точной нижней оценки коэффициента простоя системы $K_{II}(F, T^*)$, а параметры (15) – при расчёте по этой формуле точной нижней оценки средних удельных затрат $\bar{C}(F, T^*)$.

В уравнение для определения оптимальной периодичности обслуживания (формула (2)) входят коэффициенты b и m , которые связаны с коэффициентами α_1, α_2, m_1 и m_2 следующими зависимостями:

$$b = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}; \quad m = m_2 - \frac{\alpha_2 m_1}{\alpha_1}. \quad (16)$$

Таким образом, установлена связь между исходными параметрами системы непрерывного использования и параметрами, входящими в формулы (1) – (5).

Приведём методику расчёта граничных значений показателей качества технического обслуживания (коэффициента простоя, коэффициента технического использования и средних удельных затрат) для систем непрерывного использования с пополняемым резервом времени при известных начальных моментах S_1 и S_2 распределения наработки объекта до отказа.

1. Исходные данные для расчёта:

- два начальных момента S_1 и S_2 функции распределения $F(t)$ наработки объекта до отказа;
- функция распределения времени восстановления объекта $F_B(t)$ (или $\bar{F}_B(t) = 1 - F_B(t)$) с математическим ожиданием \bar{t}_B ;
- функция распределения продолжительности обслуживания $F_{TO}(t)$ (или $\bar{F}_{TO}(t) = 1 - F_{TO}(t)$) с математическим ожиданием \bar{t}_{TO} ;
- функция распределения допустимого времени восстановления объекта $D(t)$ (или $\bar{D}(t) = 1 - D(t)$) с математическим ожиданием \bar{t}_d ;
- функция распределения допустимой продолжительности обслуживания $D_1(t)$ (или $\bar{D}_1(t) = 1 - D_1(t)$) с математическим ожиданием \bar{t}_{d1} ;
- допустимое время восстановления t_d , если резерв времени – неслучайная величина;
- допустимое время продолжительности технического обслуживания t_{d1} , если резерв времени – неслучайная величина;
- средние затраты за единицу времени при восстановлении объекта c_B и при выполнении обслуживания c_{TO} .

2. Ограничения и допущения:

- после окончания обслуживания или восстановления объекта система (объект + резерв времени) полностью обновляется;

– должны выполняться условия:

$$\bar{t}_B > \bar{t}_{TO}; c_B \bar{t}_B > c_{TO} \bar{t}_{TO}; \bar{t}_B - M_B > \bar{t}_{TO} - M_{TO}; \bar{t}_B M_{TO} > \bar{t}_{TO} M_B; m = M_{TO} - \frac{c_{TO} \bar{t}_{TO}}{c_B \bar{t}_B} M_B > 0, \quad (17)$$

где M_B и M_{TO} определяется формулами (8) – (11).

3. Расчёт граничных значений коэффициента простоя и коэффициента технического использования.

3.1 Проверка выполнения принятых ограничений и допущений. Если неравенства (17) выполняются, то следует перейти к выполнению п. 3.2. При невыполнении хотя бы одного неравенства необходимо скорректировать исходные данные.

3.2 Проверка выполнения условия существования конечного значения оптимальной периодичности проведения технического обслуживания [1]:

$$[s_1(1-b) + m]^2 > 4\sigma^2, \quad (18)$$

где $\sigma^2 = s_2 - s_1^2$, а коэффициенты b и m определяются по формулам (16) и (14):

$$b = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\bar{t}_{TO} - M_{TO}}{\bar{t}_B - M_B}, \quad (19)$$

$$m = m_2 - bm_1 = \bar{t}_B M_{TO} - \bar{t}_{TO} M_B. \quad (20)$$

Если неравенство (18) выполняется, то это означает, что проведение обслуживания объекта целесообразно, т. е. существует конечное значение оптимальной периодичности $T^* < \infty$. В противном случае проводить обслуживание нецелесообразно, т. е. для принятых исходных данных $T^* = \infty$.

3.3 Определение оптимального значения периодичности обслуживания T^* путём графического решения уравнения (2).

3.4 Расчёт граничного значения (точной нижней оценки) коэффициента простоя системы $K_{II}(F, T^*)$.

После подстановки в формулу (4) выражений для α_1 , b и m_2 (формулы (14)) получаем:

$$K_{II}(F, T^*) = \frac{2(\bar{t}_{TO} - M_{TO})(s_1 - T^*)}{2\bar{t}_{TO}(s_1 - T^*) + T(4s_1 - 3T^*) - s_2}. \quad (21)$$

3.5 Расчёт граничного значения (точной верхней оценки) коэффициента технического использования системы $K_{ТИ}(F, T^*)$ по формуле (5):

$$K_{ТИ}(F, T^*) = 1 - \frac{2(\bar{t}_{TO} - M_{TO})(s_1 - T^*)}{2\bar{t}_{TO}(s_1 - T^*) + T(4s_1 - 3T^*) - s_2}. \quad (22)$$

4. Расчёт граничного значения (точной нижней оценки) средних удельных затрат.

4.1 Проверка выполнения условия существования конечного значения оптимальной периодичности обслуживания T_1^* по формуле (18), в которой коэффициент b и m определяются выражениями:

$$b = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{c_{TO} \bar{t}_{TO}}{c_B \bar{t}_B}; \quad (23)$$

$$m = M_{TO} - bM_B = M_{TO} - \frac{c_{TO} \bar{t}_{TO}}{c_B \bar{t}_B} M_B. \quad (24)$$

Выполнение неравенства (18) означает, что $T_1^* < \infty$ и проводить обслуживание целесообразно. В противном случае $T_1^* = \infty$.

4.2 Определение оптимального значения периодичности обслуживания T_1^* путём графического решения уравнения (2), в котором коэффициенты b и m определяется по формулам (23) и (24).

4. Расчёт граничного значения (точной нижней оценки) средних удельных затрат $\bar{C}(F, T_1^*)$ по формуле:

$$\bar{C}(F, T_1^*) = \frac{2c_{TO} \bar{t}_{TO}(s_1 - T_1^*)}{2M_{TO}(s_1 - T_1^*) + T_1^*(4s_1 - 3T_1^*) - s_2}, \quad (25)$$

где $M_{то}$ выражается формулами (9) или (11).

Пример 1. Рассмотрим систему непрерывного использования с пополняемым резервом времени, которая характеризуется следующими параметрами:

- начальные моменты распределения наработки объекта до отказа $s_1 = 80$ ч и $s_2 = 6416$ ч²;
- время восстановления объекта t_b распределено по экспоненциальному закону с параметром $\mu = \frac{1}{\bar{t}_b} = 0,1$ 1/ч;
- время выполнения технического обслуживания $t_{то}$ распределено по экспоненциальному закону с параметром $\theta = \frac{1}{\bar{t}_{то}} = 0,25$ 1/ч;
- допустимое время восстановления τ_d распределено по экспоненциальному закону с параметром $\gamma = \frac{1}{\bar{\tau}_d} = 0,25$ 1/ч;
- допустимое время выполнения обслуживания $\tau_{д1}$ распределено по экспоненциальному закону с параметром $\gamma_1 = \frac{1}{\bar{\tau}_{д1}} = 0,25$ 1/ч;
- средние затраты за единицу времени при восстановлении объекта $c_b = 60$ у.е/ч и при выполнении обслуживания $c_{то} = 40$ у.е/ч.

Требуется определить значения оптимальной периодичности проведения технического обслуживания, при которых достигается граничные значения коэффициента простоя, коэффициента технического использования и средних удельных затрат.

Решение. Найдём вначале граничные значения коэффициента технического использования. Предварительно по исходным данным определим коэффициенты, входящие в расчётные формулы:

$$M_b = \frac{1}{\mu + \gamma} = \frac{1}{0,1 + 0,25} = 2,857 \text{ ч};$$

$$M_{то} = \frac{1}{\theta + \gamma_1} = \frac{1}{0,25 + 0,25} = 2,0 \text{ ч};$$

$$\alpha_1 = \bar{t}_b - M_b = 10 - 2,857 = 7,143 \text{ ч};$$

$$\alpha_2 = \bar{t}_{то} - M_{то} = 4 - 2 = 2,0 \text{ ч};$$

$$b = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{2}{7,143} = 0,28;$$

$$m = \bar{t}_{то} - b\bar{t}_b = 4 - 0,28 \cdot 10 = 1,2 \text{ ч};$$

$$\sigma^2 = s_2 - s_1^2 = 6416 - 80^2 = 16 \text{ ч}^2.$$

Подставляя исходные данные в неравенство (17), убеждаемся, что все ограничения и допущения, принятые в задаче, выполняются. Расчёт по формуле (18) показывает, что данное неравенство выполняется:

$$[80(1 - 0,28) + 1,2]^2 = 3457 > 4 \cdot 16 = 64.$$

Это свидетельствует о том, что конечное значение оптимальной периодичности обслуживания существует, т. е. $T^* < \infty$.

Для определения оптимальной периодичности обслуживания T^* воспользуемся уравнением (2). Подставляя в него значения s_1 , b , m и σ^2 после несложных преобразований приходим к следующему уравнению:

$$11,578 = 0,57852T - 1,08 \cdot 10^{-2}T^2 + 8,96 \cdot 10^{-5}T^3 - 2,8 \cdot 10^{-7}T^4.$$

Решая это уравнение графическим методом (рис. 2), получаем $T^* = 64$ ч.

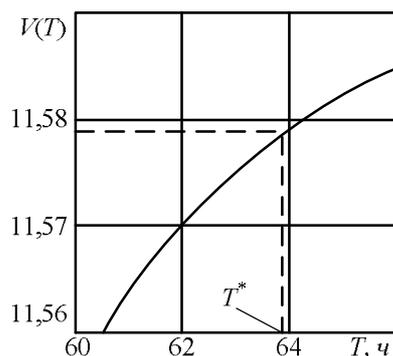


Рисунок 2 – Определение оптимальной периодичности обслуживания T^* в примере 1

Граничное значение (точную нижнюю оценку) коэффициента простоя системы $K_{\text{п}}(F, T^*)$ определяем по формуле (21):

$$K_{\text{п}}(F, T^*) = \frac{2(4-2)(80-64)}{2 \cdot 4(80-64) + 64(4 \cdot 80 - 3 \cdot 64) - 6416} = 0,0336,$$

а граничное значение коэффициента технического использования $K_{\text{ти}}(F, T^*)$ – по формуле (22):

$$K_{\text{ти}}(F, T^*) = 1 - K_{\text{п}}(F, T^*) = 1 - 0,0336 = 0,9664.$$

Определим теперь граничное значение (точную нижнюю оценку) средних удельных затрат. Предварительно рассчитаем по формулам (23) и (24) значения коэффициентов b и m :

$$b = \frac{c_{\text{то}} \bar{t}_{\text{то}}}{c_{\text{в}} \bar{t}_{\text{в}}} = \frac{40 \cdot 4}{60 \cdot 10} = 0,267,$$

$$m = M_{\text{то}} - bM_{\text{в}} = 2 - 0,267 \cdot 2,857 = 1,237.$$

После подстановки в уравнение (2) значений входящих в него параметров и несложных преобразований получаем следующее уравнение для определения оптимальной периодичности обслуживания T_1^* :

$$11,063 = 0,5518T - 1,0296 \cdot 10^{-2} T^2 + 8,544 \cdot 10^{-5} T^3 - 2,67 \cdot 10^{-7} T^4.$$

Решая это уравнение графическим методом (рис. 3), получаем $T_1^* = 65$ ч.

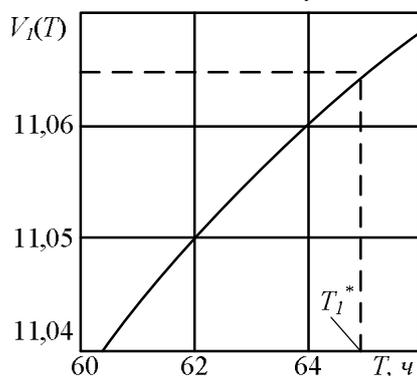


Рисунок 3 – Определение оптимальной периодичности обслуживания T_1^* в примере 1

Граничное значение (точную нижнюю оценку) средних удельных затрат $\bar{C}(F, T_1^*)$ определяем по формуле (25):

$$\begin{aligned}\bar{C}(F, T_1^*) &= \frac{2c_{\tau_0} \bar{t}_{\tau_0} (s_1 - T_1^*)}{2M_{\tau_0} (s_1 - T_1^*) + T_1^* (4s_1 - 3T_1^*) - s_2} = \\ &= \frac{2 \cdot 40 \cdot 4(80 - 65)}{2 \cdot 2(80 - 65) + 65(4 \cdot 80 - 3 \cdot 65) - 6414} = 2,714 \text{ у.е./ч.}\end{aligned}$$

IV Выводы

Таким образом, для систем непрерывного использования с временным резервом в условиях ограниченной информации о функции распределения наработки объекта до отказа получены новые расчётные соотношения для оценки граничных значений коэффициента простоя, коэффициента технического использования и средних удельных затрат, характеризующих качество технического обслуживания. Направлением дальнейших исследований в данной предметной области является получение аналогичных расчётных формул для систем эпизодического использования.

Литература: 1. Креденцер Б. П. Определение минимаксных значений функционалов, характеризующих качество технического обслуживания систем с временным резервированием, при известных моментах распределения наработки до отказа / Креденцер Б. П., Вишневский В. В., Могилевич Д. И. // *Науково-технічний збірник – К: НАУ. – 2012. – № 4. – С. 45 – 57.* 2. *Технічне обслуговування систем з часовою надмірністю: навчальний посібник* / [Креденцер Б. П., Ленков С. В., Міночкін А. І. та ін.]. – К.: ВІПІ НТУУ «КПІ», 2009. – 172 с.