

УДК 62-192:519.2

О.В. ИВАНЧЕНКО<sup>1</sup>, А.В. ПАТКАУСКАС<sup>2</sup>, С.А. МАВРИН<sup>2</sup>, Н.Н. КОРОЩЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup>Севастопольский национальный технический университет, Украина<sup>2</sup>Севастопольский военно-морской ордена Красной Звезды институт им. П.С. Нахимова, Украина

## ОБОБЩЕННЫЙ КРИТЕРИЙ СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

*Обосновываются основные положения обобщенного критерия синтеза адаптивной системы технического диагностирования сложных промышленных объектов; изложен подход по оценке их количественных показателей. Рассмотрены модели, описывающие частные критерии синтеза системы технического диагностирования сложных промышленных объектов.*

**Ключевые слова:** достоверность, адаптивная система технического диагностирования, контроль технического состояния.

### Постановка проблемы

Современные сложные промышленные объекты (СПО) представляют собой технические изделия, организация эффективной эксплуатации которых невозможна без использования, отвечающей критериям оптимизации, системы технического диагностирования (СТД).

К сложным промышленным объектам можно отнести объекты, относящиеся к изделиям критического назначения или применения. Например [1]: изделия военного назначения, радиолокационные комплексы национального космического агентства, системы управления обеспечения безопасности атомных электростанций (АЭС) и т.д.

Безусловно, для гарантированного выполнения функций использования по назначению, т.е. соответствия требованиям гарантоспособности [2], СТД сложных промышленных объектов должна строиться таким образом, чтобы обеспечить оперативный поиск, устранение отказов независимо от изменения внутренних и внешних эксплуатационных факторов СПО. При этом СТД должна одинаково достоверно и эффективно решать задачи обеспечения ремонтнопригодности СПО независимо от изменения их уровня надежности, квалификации обслуживающего персонала, ограничения ресурса и т.д.

Фактически это означает, что СТД должна рассматриваться как система мониторинга и прогнозирования технического состояния (ТС) сложных промышленных объектов, определяющая порядок их дальнейшей эксплуатации.

Исходя из указанного выше, СТД сложных промышленных объектов должна строиться по принципу адаптации к изменению тех или иных эксплуатационных характеристик и факторов.

В настоящее время четкого определения адаптивной системы не существует. Известно лишь общее представление об адаптации, как о процессе приспособления объекта исследования к изменению внутренних или внешних факторов воздействия, которые условно его выводят из установившегося состояния “равновесия”. Под состоянием “равновесия”, как правило, понимают такое состояние объекта, находясь в котором, он способен эффективно решать задачи использования по назначению в соответствии с заданным критерием оценки. Поэтому применительно к СТД адаптация заключается в ее перестройке по тем или иным признакам, в соответствии с выбранным критерием. Причем, реализуемые в СТД алгоритмы диагностирования (контроля технического состояния) должны быть оптимальными на протяжении всего жизненного цикла изделия до достижения им предельного состояния [3]. Именно в этом заключается основное отличие адаптивных систем технического диагностирования от СТД, в которых реализуются алгоритмы диагностирования, синтезированные с использованием известных методов [4].

Одним из существенных недостатков используемых в настоящее время СТД является отсутствие комплексного подхода на этапах их разработки и проектирования, что фактически позволяет их рассматривать как оптимальные лишь на относительно

небольшом временном интервале жизненного цикла изделия. Как итог, такие СТД строятся в предположении их оптимальности независимо от изменения тех или иных эксплуатационных факторов, которые более детально рассмотрены в [3].

В действительности, построенные таким образом алгоритмы диагностирования, если и являются оптимальными, то лишь в соответствии с отдельными частными критериями, которые не учитывают изменение тех или иных условий и определительных признаков эксплуатации изделия.

Конечно, охватить весь спектр факторов, влияющих на эффективность использования по назначению и учесть их при построении алгоритмов диагностирования, достаточно сложно. Однако выделить среди них наиболее важные и рассмотреть возможность адаптации объекта диагностирования к их изменению необходимо и реально. Сделать это представляется возможным путем введения группы адаптивных признаков, изменение количественных характеристик которых, в соответствии с определенным критерием, достаточно динамично отслеживается и отрабатывается в ходе реализации режимов эксплуатации в соответствующих СТД.

Поэтому решать задачу синтеза адаптивных систем технического диагностирования СПО необходимо на основе комплексного подхода с использованием обобщенного критерия.

Таким образом, задача исследования и определения области изменения допустимых значений количественных показателей соответствующих адаптивных признаков СПО для оптимизации процесса синтеза их СТД является важной и актуальной.

**Целью статьи** является обоснование и изложение основных положений обобщенного критерия синтеза адаптивных алгоритмов диагностирования СПО на основе комплексного использования усовершенствованных моделей надежности и диагностирования.

## 1. Изложение основного материала

Сложность и ответственность задач, решаемых с использованием РЭС СПО, приводит к необходимости полной интеграции их технического и информационного ресурсов.

Важной особенностью СТД таких СПО является равнозначность задач диагностики и контроля их технического состояния. Поэтому задачу синтеза адаптивной СТД одновременно можно решать и как задачу синтеза совокупности тестов для контроля технического состояния (КТС).

Разработку обобщенного критерия начнем с введения и анализа на уровне моделей соответствующих адаптивных признаков. К наиболее важным из которых, можно отнести:

информативность КТС объекта диагностирования;

достоверность КТС объекта диагностирования;

наличие альтернирующего процесса восстановления объекта диагностирования.

Каждый из указанных признаков характеризуется количественными показателями, на основе которых вводятся частные критерии синтеза СТД РЭС СПО. А предлагаемые оценочные модели используются для оптимизации соответствующей целевой функции. Рассмотрим и проанализируем модели для каждого из указанных признаков.

### 1.1. Информативность

В качестве основного показателя используется количество информации  $I$ , полученное по результатам выполнения  $\pi_i$ -й элементарной проверки объекта диагностирования. Оценка  $I$  несет в себе информацию о техническом состоянии, в котором находится объект диагностирования. Сложность [5, 6] заключается в определении в минимальной  $M$  совокупности контролируемых параметров  $N$  ( $M < N$ ), для которой количество информации  $I$ , получаемой по результатам реализации соответствующего набора элементарных проверок (далее, проверок), достигает максимального значения, т.е.

$$I \rightarrow \max, N \rightarrow \min. \quad (1)$$

Общепризнанный подход, основанный на использовании соотношения (1), предлагается дополнить следующими двумя условиями, а именно

$$F = F_3, D \geq D_3, I \rightarrow \max, N \rightarrow \min. \quad (2)$$

В соответствии с [5] будем полагать, что для серии проверок  $\pi_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  заданы условные вероятности ложного отказа (УВЛО)  $F_3$  и правильного обнаружения места отказа (УВПО)  $D_3$ .

Дополнением к данным характеристикам могут выступать частные средние взаимные информации (СВИ) между техническим состоянием объекта диагностирования (отказ есть  $I_1$ , отказа нет  $I_0$ ) и выборкой по Шеннону.

Задание (2) на вербальном уровне соответствует выбору минимального количества контролируемых параметров  $N$  по критерию максимума количества информации  $I_0$  о состоянии СПО по результатам проведения элементарных проверок при условии, что для заданного значения  $F_3$  вероятности ложного отказа  $F$ , вероятность правильного обнару-

жения отказа D будет не менее требуемого (заданного) значения  $D_3$ .

Первоначально решение этой задачи сводится к получению средней информации о состоянии СПО (отказ есть, отказа нет) по результатам проведения совокупности  $\pi_i$  элементарных проверок.

Общая формула для средней информации имеет вид:

$$I = q \cdot I_1 + p \cdot I_0, \quad (3)$$

$$I_0 = \sum_{i=1}^N P(y_i/0) \cdot \log_2 \frac{P(y_i/0)}{P(y_i)} = \sum_{i=1}^N I_{0i}, \quad (4)$$

$$I_1 = \sum_{i=1}^N P(y_i/1) \cdot \log_2 \frac{P(y_i/1)}{P(y_i)} = \sum_{i=1}^N I_{1i}. \quad (5)$$

В соотношениях (4), (5) составляющие  $I_{1i}$  и  $I_{0i}$  есть ни что иное, как количество информации о наличии и отсутствии отказа  $i$ -го элемента, которое может быть получено в ходе проведения  $\pi_i$  проверки.

Графически это можно интерпретировать следующим образом: на пространстве наблюдений  $\gamma = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$ , образованном множеством элементарных проверок СПО, при проведении проверки в точке  $y_i$ , последняя превратится в бинарную внутреннюю вершину с двумя потолками - висячими вершинами  $y_{1i}$  и  $y_{0i}$ .

Им соответствуют средние частные информации об отсутствии и наличии отказа для известных зависимостей условных вероятностей ложного отказа F и правильного обнаружения отказа D  $i$ -го элемента СПО

$$I_{0y_i} = P(y_i/0) (1-F) \log_2 \frac{P(y_i/0)(1-F)}{P(y_i,0)} + P(y_i/0) F \log_2 \frac{P(y_i/0)F}{P(y_i,1)}, \quad (6)$$

$$I_{1y_i} = P(y_i/1) (1-D) \log_2 \frac{P(y_i/1)(1-D)}{P(y_i,0)} + P(y_i/1) D \log_2 \frac{P(y_i/1)D}{P(y_i,1)}, \quad (7)$$

где

$$P(y_i,1) = p P(y_i/1) D + q P(y_i/0) F;$$

$$P(y_i,0) = p P(y_i/1) (1-D) + q P(y_i/0)(1-F).$$

С учётом (4),..., (7) соотношения для средних частных взаимных информаций для пространства наблюдений  $\tilde{\gamma}$  можно записать следующим образом:

$$I_{0\tilde{\gamma}} = \sum_{i=1}^M I_{0y_i}, \quad (8)$$

$$I_{1\tilde{\gamma}} = \sum_{i=1}^M I_{1y_i}, \quad (9)$$

где  $M < N$ .

Известно [5], что требуемые количества средних частных взаимных информаций о состоянии СПО можно определить из соотношений вида

$$I_0(D) = (1-F) \log_2 \frac{1-F}{q(1-F)+p(1-D)} + F \log_2 \frac{F}{qF+pD}, \quad (10)$$

$$I_1(D) = (1-D) \log_2 \frac{1-D}{q(1-F)+p(1-D)} + D \log_2 \frac{D}{qF+pD}. \quad (11)$$

Тогда при выполнении совокупности проверок  $\pi_i$ , где  $i = \overline{1, M}$ , на каждом определённом шаге, следует вычислять средние частные взаимные информации  $I_{0\tilde{\gamma}}$ ,  $I_{1\tilde{\gamma}}$  и затраты Z (например, среднюю продолжительность выполнения проверок  $T_{CP}$ ).

Далее для каждой  $j$ -ой последовательности проверок в рамках решения задачи (2) в цикле от  $D = D_3$  до 1 необходимо проверять выполнение условий

$$I_{0\tilde{\gamma}} \geq I_0(D), \quad I_{1\tilde{\gamma}} \geq I_1(D). \quad (12)$$

В дальнейшем процесс поиска оптимальной совокупности параметров для контроля технического состояния СПО рекомендуется осуществлять в полном соответствии со следующей методикой:

1) для фиксированного значения  $F = F_3$  и значений  $D = [D_3, 1]$  по формулам (10), (11) определить требуемое количество средних частных взаимных информаций  $I_0(D)$  и  $I_1(D)$

2) на пространстве наблюдений

$$\gamma = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$$

при проведении проверок в точках  $y_i$ , где  $i = \overline{1, M}$  по формулам (6),..., (9) вычислить средние частные взаимные информации  $I_{0\tilde{\gamma}}$  и  $I_{1\tilde{\gamma}}$ ;

3) по результатам проверки выполнения условия (12) выбрать оптимальную совокупность параметров для контроля технического состояния СПО.

Решение задачи синтеза алгоритмов диагностирования выполняется с учётом выбранной ведущей функции, в качестве которой могут быть использованы:

1) цена информации, характеризуемая отношением  $I_i/C_i$ , где  $C_i$  – стоимость выполнения  $\pi_i$  проверки. Алгоритм диагностирования начинается с проверки, для которой  $I_i/C_i = \min$ ;

2) скорость получения информации, характеризуемая отношением  $I_i/t_i$ , где  $t_i$  – продолжительность

ность выполнения  $l_i$  проверки, для которой  $I_i/g_i = \max$ ;

3) количество информации  $I$ , содержащейся в  $l_i$  проверке. Алгоритм диагностирования начинается с проверки, несущей наибольшее количество информации, т.е.  $I_i = \max$ .

Для выбора лучшего из синтезированных алгоритмов будем учитывать не только количественные оценки, но и качественный состав информации о результатах выполненных проверок. В синтезируемых алгоритмах диагностирования качество обнаружения места отказа задают условными вероятностями правильного обнаружения места отказа  $D$  и ложного отказа  $F$ . При этом возможное максимальное значение частных СВИ может быть получено из выражений (6), (7) путём предельного перехода  $D \rightarrow 1$ ,  $F \rightarrow 0$  и составляет соответственно  $I_{0\max} = -\log_2 q$ ,  $I_{1\max} = -\log_2 p$ . Тем самым, для обеспечения заданных УВПО  $D$  и УВЛО  $F$  при заданных априорных вероятностях безотказной работы  $p$  и отказа  $q$  рассматриваемой СПО, необходимо, чтобы среднее частные взаимные информации  $I_{0\bar{y}}$  и  $I_{1\bar{y}}$  результатов элементарных проверок разработанного алгоритма диагностирования в системе координат  $I_0$  и  $I_1$ , по крайней мере, попали в правый верхний квадрант относительно точки, характеризующей  $\varepsilon$ -энтропию синтезируемых алгоритмов (рис. 1).

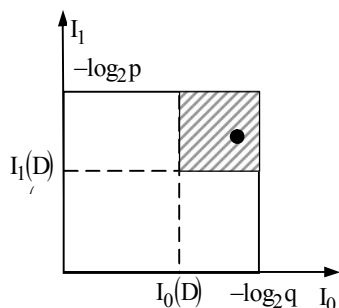


Рис. 1. Отображение  $\varepsilon$ -энтропии и вариантов соотношения средних взаимных информаций  $I_{0\bar{y}}$  и  $I_{1\bar{y}}$

Более детально синтез оптимальных алгоритмов диагностирования РЭС сложных промышленных объектов с использованием предложенного подхода рассмотрен в [7].

## 1.2. Достоверность

Расчет показателей достоверности выполним на основе использования усовершенствованной математической модели КТС для многопараметрического контроля объекта диагностирования [8].

В рассматриваемой модели процесс контроля реализуется по следующей схеме: состояние объекта контроля (ОК) характеризуется совокупностью  $N$  параметров.

Средства контроля по определенной программе проверяют всю совокупность параметров и вырабатывают интегральное заключение о состоянии ОК. Эффективность функционирования системы КТС, работающей по данной схеме оценивается с помощью следующих показателей диагностирования:

1) достоверность ДРС решения «ОК-РС» (объект контроля - работоспособен);

2) достоверность ДНРС решения «ОК-НРС» (объект контроля - неработоспособен).

Предлагаемая модель строится в предположении, что система КТС находится в следующих состояниях:

$$\ell = \begin{cases} 1, \text{ РС,} \\ 2, \text{ НРС,} \\ 3, \text{ НРС,} \end{cases} \quad (13)$$

где  $\ell=1$  – средства контроля фиксируют результат «объект контроля – работоспособен» независимо от действительного состояния объекта контроля при выдаваемой индикации средств контроля «ОК-РС»;

$\ell=2$  – средства контроля фиксируют результат «объект контроля – неработоспособен» независимо от действительного состояния объекта контроля при выдаваемой индикации средств контроля «ОК-НРС»;

$\ell=3$  – средства контроля фиксируют результат «объект контроля – неработоспособен» при выдаваемой индикации средств контроля «ОК-РС».

Тогда для многопараметрического объекта получаем соотношения вида:

$$D_{\text{РС}} = \frac{P - P_{12}}{P - P_{12} + P_{21}}, \quad (14)$$

$$D_{\text{НРС}} = \frac{(1 - P) - P_{21}}{(1 - P) - P_{21} + P_{12}}, \quad (15)$$

$$P = \prod_{v=1}^N P_v, \quad (16)$$

$$P_{12} = P_1^0 [P_1^c P_{2,1} + P_3^c], \quad (17)$$

$$P_{21} = P_2^0 [P_1^c P_{1,2} + P_2^c], \quad (18)$$

$$P_{1,2} = P_1^c \left[ \prod_{v=1}^N P_v - \prod_{v=1}^N (P_v + \alpha_{v,1}) \right] + P_3^c \prod_{v=1}^N P_v, \quad (19)$$

$$P_{2,1} = P_1^c \left[ \prod_{v=1}^N (P_v - \alpha_{v,1} + \beta_{v,1}) - \prod_{v=1}^N (P_v - \alpha_{v,1}) \right] + P_2^c \left( 1 - \prod_{v=1}^N P_v \right), \quad (20)$$

где  $P_v$  – вероятность того, что параметр  $v$  находится в области допустимых значений;

$P_{1,2}$  – условная вероятность того, что в результате контроля объект контроля признан неработоспособным при условии, что он работоспособен, а средства контроля находятся в состоянии  $\ell=1$ ;

$P_{2,1}$  – условная вероятность того, что в результате контроля объект контроля признан работоспособным при условии, что он неработоспособен, а средства контроля находятся в состоянии  $\ell = 1$ ;

$P_1^c, P_2^c, P_3^c$  – априорные вероятности нахождения средств контроля в состояниях  $\ell = 1, 2, 3$  соответственно;

$P_1^0, P_2^0$  – априорные вероятности нахождения объекта контроля в технических состояниях работоспособен и неработоспособен, соответственно;

$\alpha_{v,1}$  – вероятность того, что  $v$ -й параметр находится в поле допуска, но по результатам контроля рассматривается как параметр, вне поля допуска при  $\ell = 1$ ;

$\beta_{v,1}$  – вероятность того, что  $v$ -й параметр находится вне поля допуска, но по результатам контроля рассматривается как параметр, в поле допуска при  $\ell = 1$ .

На рис. 2 представлены графики зависимости  $D_{PC}(\alpha_{v,1}, \beta_{v,1})$  и  $D_{HPC}(\alpha_{v,1}, \beta_{v,1})$  для следующих исходных данных: количество контролируемых параметров  $v=10$ ; априорные вероятности нахождения средств контроля в состояниях  $\ell=1, 2, 3$   $P_1^c = 0.97, P_2^c = 0.02, P_3^c = 0.01$ ; априорные вероятности нахождения объекта контроля в технических состояниях работоспособен и неработоспособен  $P_1^0 = 0.85, P_2^0 = 0.15$ .

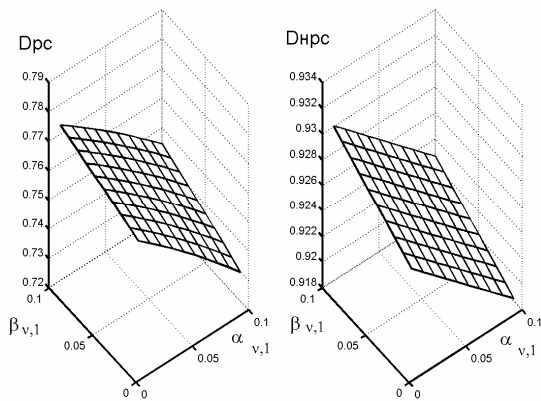


Рис. 2. Графики зависимости  $D_{PC}(\alpha_{v,1}, \beta_{v,1})$  и  $D_{HPC}(\alpha_{v,1}, \beta_{v,1})$

### 1.3. Альтернирующий процесс восстановления

Существование такого процесса восстановления объекта диагностирования предполагает наличие чередующихся во времени интервалов безотказной работы и восстановления. Специфика эксплуатации СПО, а также учет условий возникновения их отказов позволяет рассматривать соответствующую модель надежности как полумарковскую модель, с помощью которой можно оценить соответствующие показатели эффективности функционирования СТД изделий. Исходя из этого, получаем полумарковскую модель надежности объекта диагностирования со встроенной системой контроля технического состояния, функционирующей с учетом различных режимов эксплуатации объекта диагностирования. В частности, рассмотрим пример функционирования аналогичной системы КТС с учетом возникновения скрытых отказов в соответствии с графом состояний, приведенном на рис. 3.

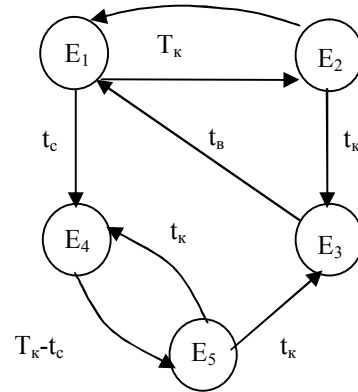


Рис. 3 . Размеченный граф смены технических состояний СПО

Будем полагать, что в начальный момент эксплуатации на работоспособном (РС) и готовом к применению СПО (состояние  $E_1$ ) с установленной периодичностью  $T_k$  в течение интервала времени  $t_k$  проводится КТС (состояние  $E_2$ ).

Продолжительности интервалов времени  $T_k \in [0; t_1]$  и  $t_k \in [t_1; t_1 + \Delta t_k]$ , где  $\Delta t_k \neq 0$ , являются неслучайными (детерминированными) величинами. В ходе КТС в случайные моменты времени, распределенные по экспоненциальному закону, могут возникать внезапные и ложные отказы.

При их возникновении производится восстановление РС СПО (состояние  $E_3$ ), которое длится случайное время  $t_b$ , распределенное по закону Эрланга, после чего СПО переходит в состояние  $E_1$ .

В течение интервала времени  $t \in [0; t_r]$  готовности СПО к эксплуатации в случайные моменты времени  $t_c$ , распределенные по гамма-распределению,

возникают скрытые отказы, при которых СПО переходит в неработоспособное (НРС) состояние  $E_4$ . При этом будем считать что скрытые отказы возникают только при накоплении некоторого числа повреждений  $r$ . Далее из состояния  $E_4$  через случайное время  $T_k - t_c$  СПО переходит в состояние контроля технического состояния  $E_5$ . При проведении контроля в состоянии  $E_5$  отказ вскрывается с достоверностью  $d$  и СПО переходит через неслучайное время  $t_k$  в состояние  $E_3$  (восстановления) или за такое же время с вероятностью  $1-d$  отказ не обнаруживается, т.е. СПО возвращается в состояние  $E_4$ .

В соответствии с описанием процесса (рис.3), получим его количественные характеристики в виде вектора значений  $Q(X) = \{Q_{ij}(X, t)\}$  [9].

Поскольку периодические проверки следуют через неслучайное время  $T_k$ , имеем

$$Q_{12} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < T_k, \\ 1, & \text{при } t \geq T_k, \end{cases} \quad (21)$$

где  $Q_{ij}$  – функция распределения времени пребывания элемента в  $i$ -м ( $i = \overline{1,5}$ ) состоянии перед перемещением в  $j$ -е, если бы данный выход был единственным.

Переход из состояния  $E_1$  в состояние  $E_4$  осуществляется в случайное время  $t_c$ , подчиненное гамма-распределению с интенсивностью возникновения скрытых повреждений  $\lambda_3$  до момента  $T_k$ , т.е.

$$Q_{14}(t) = \begin{cases} 1 - \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda_3 t)^k}{k!} e^{-\lambda_3 t}, & \text{при } t < T_k, \\ 0, & \text{при } t \geq T_k. \end{cases} \quad (22)$$

Переход из состояния  $E_2$  в работоспособное состояние  $E_1$  при отсутствии отказов в ходе КТС происходит через не случайное время  $t_k$ , равное продолжительности проверки технического состояния, поэтому

$$P_1 = \frac{\frac{1}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 T_k})}{\frac{1}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 T_k}) + \frac{e^{-\lambda_3 T_k}}{\lambda_1 + \lambda_2} (1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t_R}) + \frac{2(1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t_k} e^{-\lambda_3 T_k})}{\mu} + \frac{1 - e^{-\lambda_3 t}}{d} \left( \frac{T_k}{1 - e^{-\lambda_3 T_k}} - \frac{1}{\lambda_3} + t_k \right)}, \quad (28)$$

$$P_2 = \frac{e^{-\lambda_3 T_k} \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} (1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t_k})}{\frac{1}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 T_k}) + \frac{e^{-\lambda_3 T_k}}{\lambda_1 + \lambda_2} (1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t_R}) + \frac{2(1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t_k} e^{-\lambda_3 T_k})}{\mu} + \frac{1 - e^{-\lambda_3 t}}{d} \left( \frac{T_k}{1 - e^{-\lambda_3 T_k}} - \frac{1}{\lambda_3} + t_k \right)}, \quad (29)$$

$$P_3 = \frac{(1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t_k} e^{-\lambda_3 T_k}) \frac{2}{\mu}}{\frac{1}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 T_k}) + \frac{e^{-\lambda_3 T_k}}{\lambda_1 + \lambda_2} (1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t_R}) + \frac{2(1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t_k} e^{-\lambda_3 T_k})}{\mu} + \frac{1 - e^{-\lambda_3 t}}{d} \left( \frac{T_k}{1 - e^{-\lambda_3 T_k}} - \frac{1}{\lambda_3} + t_k \right)}, \quad (30)$$

$$Q_{21} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_k, \\ 1, & \text{при } t \geq t_k. \end{cases} \quad (23)$$

Переход из  $E_2$  в состояние  $E_3$  из-за возникших в случайные моменты времени внезапных и ложных отказов характеризуется вероятностью

$$Q_{23} = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t}, \quad (24)$$

где  $\lambda_1$  – интенсивность внезапных отказов;  $\lambda_2$  – интенсивность ложных отказов.

Переход из состояния  $E_3$  (восстановление РС) в состояние  $E_1$  зависит от случайной величины  $t_b$ , распределенной по закону Эрланга, для которого [9]

$$Q_{31}(t) = 1 - (1 + \mu t) e^{-\mu t}, \quad (25)$$

где  $\mu$  – интенсивность восстановления.

Переход из состояния скрытых отказов  $E_4$  в состояние восстановления  $E_3$  происходит через неслучайное время  $t_k$  с вероятностью  $d$ , поэтому

$$Q_{53} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_k, \\ d, & \text{при } t \geq t_k. \end{cases} \quad (26)$$

В (22) вероятность  $d$  рассматривается как достоверность КТС.

В случае не обнаружения скрытого отказа системой КТС осуществляется переход через неслучайное время  $t_k$  из состояния  $E_5$  в состояние  $E_4$  с вероятностью  $1 - d$

$$Q_{54} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_k, \\ 1 - d, & \text{при } t \geq t_k. \end{cases} \quad (27)$$

В соответствии с [10] финальные вероятности пребывания исследуемой модели (рис. 3) в каждом  $i$ -м состоянии рассчитываются по соотношениям вида:

$$P_4 = \frac{\left(\frac{1-e^{-\lambda_3 t}}{d}\right)\left(\frac{T_K}{1-e^{-\lambda_3 T_K}} - \frac{1}{\lambda_3}\right)}{\frac{1}{\lambda_3}(1-e^{-\lambda_3 T_K}) + \frac{e^{-\lambda_3 T_K}}{\lambda_1 + \lambda_2}(1-e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t_R}) + \frac{2(1-e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t_K} e^{-\lambda_3 T_K})}{\mu} + \frac{1-e^{-\lambda_3 t}}{d}\left(\frac{T_K}{1-e^{-\lambda_3 T_K}} - \frac{1}{\lambda_3} + t_K\right)}, \quad (31)$$

$$P_5 = \frac{\left(\frac{1-e^{-\lambda_3 t}}{d}\right)t_K}{\frac{1}{\lambda_3}(1-e^{-\lambda_3 T_K}) + \frac{e^{-\lambda_3 T_K}}{\lambda_1 + \lambda_2}(1-e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t_R}) + \frac{2(1-e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t_K} e^{-\lambda_3 T_K})}{\mu} + \frac{1-e^{-\lambda_3 t}}{d}\left(\frac{T_K}{1-e^{-\lambda_3 T_K}} - \frac{1}{\lambda_3} + t_K\right)}. \quad (32)$$

С учетом начальных технических состояний [11], воспользовавшись соотношениями (28) и (30), рассчитаем значения нестационарного коэффициента оперативной готовности по формулам:

$$K_{o.g.}(t) = [P_1(t)K_{\Gamma}(t_{ож}) + P_3(t)K_{\Gamma}(t_{ож})]P(\tau), \quad (33)$$

$$P(\tau) = e^{-\Lambda\tau}, \quad (34)$$

где  $P_1(t)$  – вероятность того, что СПО находится в работоспособном состоянии  $E_1$ ;

$P_3(t)$  – вероятность того, что СПО находится в неработоспособном состоянии  $E_3$ ;

$K_{\Gamma}(t_{ож})$ ,  $\overset{\circ}{K}_{\Gamma}(t_{ож})$  – значения нестационарных коэффициентов готовности СПО в момент времени  $t_{ож}$  окончания интервала ожидания при условии, что в момент начала интервала ожидания СПО был РС с вероятностью  $P_1(t)$  или НРС с вероятностью  $P_3(t)$ ;

$P(\tau)$  – вероятность безотказной работы СПО на интервале эксплуатации  $\tau \in [t_{ож}; t_{ож} + \Delta t_p]$ ;

$t_p$  – продолжительность использования изделия по назначению;

$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$  – суммарная интенсивность отказов СПО.

На рис. 4, ..., 6 представлены графики зависимостей  $K_{o.g.}(T_K)$  и  $K_{o.g.}(d)$  для следующих исходных данных: интенсивность скрытых механических повреждений изделий из состава СПО  $\lambda_3 = 0,1 \text{ ч}^{-1}$ ; интенсивность внезапных отказов радиоэлектронных средств СПО  $\lambda_1 = 0,2 \text{ ч}^{-1}$ ; интенсивность ложных отказов  $\lambda_2 = 0,1 \text{ ч}^{-1}$ ; интенсивность восстановления работоспособности механических и радиоэлектронных составляющих СПО  $\mu = 1 \text{ ч}^{-1}$ ; продолжительности интервалов контроля  $t_k = 10$  мин, ожидания  $t_{ож} = 1$  час, эксплуатации  $\tau = 20$  мин.

С помощью представленных зависимостей (рис. 4, ..., 6) установлено, что

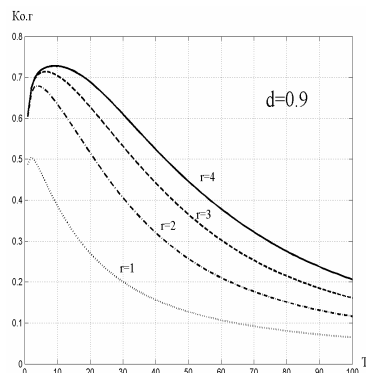


Рис. 4. Графики зависимостей  $K_{o.g.}(T_K)$ , для  $\gamma = \overline{1,4}$

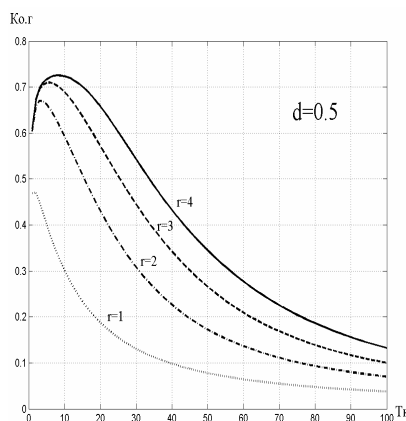


Рис. 5. Графики зависимостей  $K_{o.g.}(T_K)$ , для  $\gamma = \overline{1,4}$

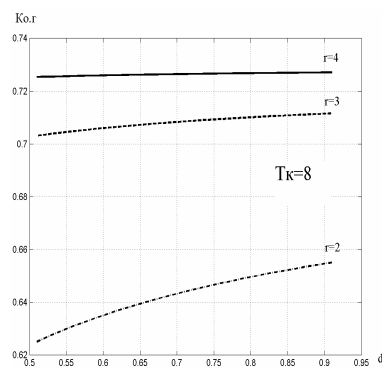


Рис. 6. Графики зависимостей  $K_{o.g.}(d)$ , для  $\gamma = \overline{2,4}$

— для СПО с низким уровнем надежности ( $0,4 \leq K_{OГ} \leq 0,7$ ) требуемые (оптимальные) значения показателей качества функционирования системы КТС для  $r=1$  составляют:  $t_{kmin} = 3$  мин,  $t_{kmax} = 9$  мин; величина периода КТС изменяется в пределах  $T_k \in [2ч, \dots, 3ч]$ , а достоверность КТС ( $d$ ) должна составлять не менее 0,9;

— для высоконадежных СПО ( $K_{OГ} > 0,7$ ) требуемые (оптимальные) значения показателей качества функционирования системы КТС для  $r = 4$  составляют:  $t_{kmin} = 3$  мин,  $t_{kmax} = 23$  мин; величина оптимального периода КТС изменяется в пределах  $T_k \in [8ч, \dots, 9ч]$ , а достоверность КТС ( $d$ ) должна составлять не менее 0,5.

## 2. Анализ полученных результатов

Выполненные исследования и анализ полученных расчетных данных соответствующих показателей диагностирования и надежности позволяют сформулировать условия обобщенного критерия. Выражение для разработанного критерия можно представить следующим образом:

$$\xi = \begin{cases} V^{(\pi_i)} \geq V_{зад}, \\ \Delta D \leq D_{min}, \\ K_{OГ}(P_1^0, P_2^0) \geq K_{OГтр}, \end{cases} \quad (23)$$

$$\Delta D = |D_{PC} - D_{HPC}|, \quad (24)$$

где  $V$  — полнота контроля СПО.

Фактически, обобщенный критерий синтеза адаптивной системы технического диагностирования радиоэлектронных средств сложных промышленных объектов (23) есть ни что иное, как совокупность частных критериев для оценки на количественном уровне каждого из трех адаптивных признаков.

В (23) требуемые значения соответствующих показателей обосновываются по результатам предварительных определительных испытаний или на уровне экспертных оценок.

## Заключение

Разработанные критерий и соответствующие модели адекватно отражают ситуации, имеющие место при эксплуатации и технической диагностике сложных промышленных объектов.

Дальнейшие перспективы их использования могут быть рассмотрены в ракурсе решения научных задач по обеспечению и обоснованию требований для управления техническим состоянием различных СПО и изделий критического применения

## Литература

1. Ястребенецкий М.О. Оценка уровня безопасности информационных и управляющих систем АЭС / М.О. Ястребенецкий, В.В. Инюшев, О.Н. Бутова // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи* – №8 (27). – Харків: ХАІ, 2007. – С. 96-103.
2. Харченко В.С. Гарантоздатність комп'ютерних систем: межа універсальності у контексті інформаційно-технічних станів / В.С. Харченко // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи* – №8 (27). – Харків: ХАІ, 2007. – С. 7-14.
3. Острейковский В.А. Теория надежности / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.
4. Глуценко П.В. Техническая диагностика: Моделирование в диагностировании и прогнозировании состояния технических объектов / П.В. Глуценко. – М.: Вузовская книга, 2004. – 248 с.
5. Саваневич В.Е. Анализ приращения информации при получении бинарно - квантованного сигнала в последовательной серии наблюдений / В.Е. Саваневич // *Збірник наукових праць*, випуск 3(41). – Харків: ХВУ, 2002. – С. 100-104.
6. Саваневич В.Е. Постановка задачи синтеза алгоритмов минимальной сложности / В.Е. Саваневич // *Системы обработки информации, збірник наукових праць*, випуск 4(20). – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – С. 69-79.
7. Колпаков В.А. Информационный подход к синтезу оптимальных алгоритмов диагностирования сложной технической системы / В.А. Колпаков, О.В. Иванченко, С.А. Маврин, Н.В. Докукина // *Збірник наукових праць*, випуск 3 (6). – Севастополь: СВМИ, 2004. – С. 30-37.
8. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т. 9. / Под ред. Р.С. Судакова, О.И. Тескина. – М.: Машиностроение, 1989. – 376 с.
9. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов / Л.И. Волков. – М.: Высшая школа, 1981. – 368 с.
10. Носенко В.И. Полумарковская модель надежности зенитного ракетного комплекса надводного корабля со встроенной системой контроля технического состояния / В.И. Носенко, О.В. Иванченко, С.А. Маврин // *Збірник наукових праць*, випуск 4 (53). – Харків: ХУПС, 2006. – С. 144-151.
11. Колпаков В.А. Аналитико-стохастическая модель надежности изделия военного назначения со сложными режимами эксплуатации / В.А. Колпаков, О.В. Иванченко, Л.Н. Данилович, С.А. Маврин // *Збірник наукових праць*, випуск 1 (7). – Севастополь: СВМИ, 2005. – С. 17-25.

Поступила в редакцию 11.01.2009



Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### УЗАГАЛЬНЕНИЙ КРИТЕРІЙ СИНТЕЗУ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СКЛАДНИХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

*О.В. Иванченко, О.В. Паткаускас, С.А. Маврин, М.М. Корощенко*

Обґрунтовуються основні положення узагальненого критерію синтезу адаптивної системи технічного діагностування складних промислових об'єктів; викладений підхід по оцінці їхніх кількісних показників. Розглянуто моделі, що описують часткові критерії синтезу системи технічного діагностування складних промислових об'єктів.

**Ключові слова:** вірогідність, адаптивна система технічного діагностування, контроль технічного стану.

### GENERALISED CRITERION OF THE SYNTHESSES OF THE ADAPTIVE SYSTEM TECHNICAL DIAGNOSTICS COMPLEX INDUSTRIAL OBJECT

*O.V. Ivanchenko, A.V. Patkauskas, C.A. Mavrin, N.N. Koroschenko*

Generalized criterion of complex industrial objects adoptive diagnostic system synthesis is formed. Approach to estimation by use of quantitative indexes is analyzed. Models of diagnostic system synthesis are described.

**Key words:** validity, adaptive system of technical diagnostics, checking the technical condition.

**Иванченко Олег Васильевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры кибернетики и вычислительной техники Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина.

**Паткаускас Александр Витаутасович** – кандидат технических наук, начальник факультета корабельной энергетики Севастопольского военно-морского ордена Красной Звезды института им. П. С. Нахимова, Севастополь, Украина.

**Маврин Сергей Анатольевич** – преподаватель кафедры радиотехнического вооружения факультета вооружения Севастопольского военно-морского ордена Красной Звезды института им. П. С. Нахимова, Севастополь, Украина, e-mail: Mavriy@mail.ru.

**Корощенко Николай Николаевич** – адъюнкт научно-организационного отдела Севастопольского военно-морского ордена Красной Звезды института им. П. С. Нахимова, Севастополь, Украина.