

# МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТОЧЕК ДИАГНОСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИСПРАВНОСТИ СЛОЖНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ОБЪЕКТОВ

**Мистров Л.Е.**, д-р техн. наук, проф., проф., проф. кафедры ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Центральный филиал «Российский государственный университет правосудия», гл. спец. ФГБУ «Институт стандартизации»

**Белоцерковский О.А.**, преподаватель кафедры ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

*Основу построения информационно-обучающих систем (ИОС) для подготовки специалистов по диагностике сложных радиоэлектронных объектов (РЭО) и поиску неисправностей (ПН) составляют методы локализации элементарных, групповых и кратных (зависимых) неисправностей. Вследствие того, что встроенные точки контроля не позволяют на практике применить методы статистического анализа и прогнозирования технического состояний РЭО, возникает задача обоснования дополнительных точек контроля путем решения двух групп типовых оптимизационных подзадач. Первая группа связана с распределением выделенного ресурса средств ПН по маршрутам диагностического контроля наиболее важных элементов РЭО, а вторая группа – оптимального распределения количества средств ПН по элементам контроля заданных участков диапазона условий применения функциональных частей (подсистем) РЭО. Трудности решения данных задач оптимизации состоят в следующем: а) применение ИОС обеспечивает одновременное решение поиска групповых и кратных неисправностей с учетом результатов эффективности встроенных точек контроля; б) количество средств групповых и кратных неисправностей ограничивается эффективностью средств поиска элементарных неисправностей.*

*Решение данной задачи оптимального распределения ресурса ИОС по наиболее важным элементам РЭО осуществляется на основе методов ветвей и границ, максимального элемента и процедур поиска оптимальных решений. При этом в основу показателя эффективности распределения ресурса средств ПН в ИОС положено приращение средней вероятности решения задач ПН, основанной на отношении количества информации, которую необходимо получить о состоянии РЭО к количеству информации, которая получена в результате диагностического контроля. Это позволило на основе распределения дополнительных точек контроля осуществить оптимизировать их количество для локализации неисправностей с точностью до выделенной структурной единицы РЭО.*

**Ключевые слова:** радиоэлектронный объект, типы неисправностей, информационно-обучающая система, техническая диагностика, дополнительные точки контроля, программно-аппаратные средства поиска неисправностей, оптимизация средств.

**Цитирование:** Мистров Л.Е., Белоцерковский О.А. Метод обоснования дополнительных точек диагностического анализа исправности сложных радиоэлектронных объектов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2024. № 4(79). С. 33–40.

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях аппаратура, объединенная по целевому назначению различного типа в сложные радиоэлектронные объекты (РЭО), обладает высокими технологическими возможностями по выполнению тех или иных функциональных задач. Однако, сложность их конструктивного исполнения, ограниченная надежность элемент-

ной базы, а также отдельных устройств и блоков в условиях воздействия различного рода внешних факторов, приводят к ее элементарным, групповым и кратным неисправностям или отказам [1, 2], имеющим детерминированную и вероятностную природу. При этом с увеличением сложности РЭО значительно возрастают и расходы на поддержание их в работоспособном состоянии на основе ликвидации тех или иных последствий неисправности. Поэтому, чем

раньше будет обнаружена причина неисправности и чем выше достоверность ее установления, тем эффективнее являются мероприятия по предупреждению и поддержанию РЭО в работоспособном состоянии.

Основу средств диагностики работоспособности РЭО составляют программно-аппаратные средства контроля, располагаемые в специально оборудованных для этого местах, обеспечивающие высокую степень достоверности определения причин его неисправностей и их последующее устранение. Требования же по поддержанию РЭО в готовности к применению обуславливают возникновение противоречия между требованиями быстрого установления причин и устранения неисправности и невозможностью осуществить это в пунктах эксплуатации РЭО в кратчайшие сроки, которое, как показано [3], возможно разрешить с использованием современных методов и средств технической диагностики. Это обуславливает возникновение противоречия между требованиями быстрого установления причин и устранения неисправности и невозможностью осуществить это в пунктах непосредственной эксплуатации РЭО в кратчайшие сроки, которое возможно разрешить в современных условиях только на основе разработки информационно-обучающих систем (ИОС) для формирования у специалистов профессиональных умений и навыков решения задач поиска неисправностей и прогнозирования технического состояния РЭО с использованием современных методов диагностики и информационных технологий [1–3].

Наиболее общим показателем эффективности процесса поиска неисправностей в РЭА сложных РЭО является показатель, характеризующий степень соответствия принимаемых решений специалистами – лицами, принимающими решение (ЛПР) об исправности / неисправности РЭО исходя из диагностического анализа (контроля) его состояний. Анализ особенностей эксплуатации РЭО различного назначения с учетом существующей практики поиска и устранения неисправностей показывает, что в настоящее время задача обеспечения работоспособности РЭО решается на основе применения: а) технических средств диагностики в виде аппаратных средств встроенного диагностического контроля, а также специально встроенных программно-аппаратных точек диагностики, функции которых состоят в выдаче оповещений специалистам о наличии неисправности в наиболее важных элементах; б) так как не все элементы оснащены встроенными точками диагностики, специалистами на некоторых из них, исходя из практики применения РЭО, устанавливаются дополнительные программные точки контроля, функциями которых является выдача информации о неисправностях на данных элементах; в) традиционно большую часть неисправностей специалисты определяют с использованием контрольно-измерительной аппаратуры общего назначения, реализуя «внешнюю» функцию поиска неисправностей в РЭО. При этом, исходя из анализа функций

средств диагностики, для поиска неисправностей в РЭО на встроенные программно-аппаратные средства диагностики целесообразно возложить функциональных задач поиска элементарных неисправностей в РЭО, дополнительные программные средства – групповых неисправностей, а на специалиста (ЛПР) – осуществление поиска кратных неисправностей на основе комплексного использования всех программно-аппаратных средств и других средств диагностики [1–3]. Исходя из этого, данный показатель количественно может определяться через энтропию – меру неопределенности состояний исправности РЭО, которая позволяет определить степень соответствия принимаемых решений ЛПР по установлению тех или иных неисправностей.

Решение задачи по оптимальному поиску неисправностей в РЭО основывается на применении разнообразных технических методов и средств диагностики РЭА наиболее важных их элементов. С этой целью они оснащаются программно-аппаратными средствами контроля работоспособности на основе специально встроенных точек диагностики, решающих задачи по обнаружению, как правило, элементарных неисправностей. При сложных неисправностях (кратных, групповых и неисправностей ЭВМ и связанных с ними элементов) [1–3] становится затруднительным определение работоспособности отдельно взятых подсистем и элементов РЭО. Кроме того, встроенные точки диагностического контроля исправности РЭО не отвечают в полной мере требованиям практики и не обеспечивают диагностирование зависимых (кратных) неисправностей, что обуславливает задачу обоснования дополнительных точек контроля. Исходя из анализа функций средств диагностики для поиска и устранения неисправностей в РЭО на встроенные программно-аппаратные средства диагностики целесообразно возложить функциональных задач поиска элементарных неисправностей в РЭО, дополнительные программные средства – групповых неисправностей, а на человека-оператора – осуществление поиска кратных неисправностей на основе комплексного использования всех программно-аппаратных средств диагностики [1]. Эти обстоятельства обуславливают необходимость решения задачи обоснования точек дополнительного контроля при использовании ИОС на основе оптимизации распределения внутренних функций диагностики между встроенными программно-аппаратными, дополнительными программными и «внешними» средствами диагностики, определяя тем самым целевую направленность и содержание предлагаемой статьи.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае применение ИОС основывается на решении двух групп типовых оптимизационных задач. Первая группа связана с распределением выделенного ресурса (заданного количества) средств поиска неисправностей (ПН) по маршрутам функционального диагностического

контроля элементарных, групповых и кратных неисправностей в наиболее важных разнотипных элементах РЭО. Вторая группа задач определяет оптимальное распределение внутреннего ресурса – количества средств ПН по элементам контроля заданных участков диапазона условий применения (ДУП) функциональных частей (подсистем) РЭО.

Основные методологические трудности решения данных задач оптимизации, обусловленные особенностями применения ИОС, состоят в следующем:

- применение ИОС обеспечивает одновременное решение задач поиска групповых и кратных неисправностей с учетом результатов эффективности встроенных средств диагностического контроля элементарных неисправностей в наиболее важных элементах РЭО;
- количество средств поиска групповых и кратных неисправностей в структуре РЭО ограничивается эффективностью средств поиска элементарных неисправностей.

С учетом этих обстоятельств, задача распределения ресурса ИОС по наиболее важным элементам РЭО может быть сформулирована следующим образом.

Задано:

$I$  – множество задач ПН в структуре РЭО, подлежащих решению ИОС;

$n_i$  – множество (вектор) средств ПН для выполнения  $i$ -ой задачи;

$V_{jk}^i$  – множество  $k$ -го,  $k = \overline{1, K}$  типа средств ПН в  $j$ -ом,  $j = \overline{1, J}$  участке ДУП, используемых для решения  $i$ -ых,  $i = \overline{1, I}$  задач ПН в наиболее важных элементах РЭО;

$R_j$  – множество (вектор) средств ПН в  $j$ -ом,  $j = \overline{1, J}$  участке ДУП функциональных частей РЭО в составе ИОС;

$\mathcal{E}_j$  – множество (вектор) маршрутов диагностического контроля, одновременно реализуемых ИОС в  $j$ -ом,  $j = \overline{1, J}$  участке ДУП РЭО.

Вектор  $\mathcal{E}_j$  характеризует возможности ИОС одновременно проконтролировать несколько наиболее важных разнотипных элементов РЭО, отличающихся маршрутами диагностического контроля и попадающих по ДУП в несколько ее маршрутов. В связи с этим необходимо учитывать распределение ресурса средств ПН, как по маршрутам диагностического контроля, так и по средствам ПН в каждом маршруте. Поэтому, для формирования постановки задачи вводится понятие нормативного значения требуемого внутреннего ресурса ИОС для ПН в  $k$ -ом,  $k = \overline{1, K}$  типе наиболее важных элементов РЭО в  $j$ -ом участке ДУП

для решения  $i$ -ой задачи – вектор маршрутов диагностического контроля  $\{\mathcal{E}_{jk}^i\}$ ,  $\sum_{i \in I} \mathcal{E}_{jk}^i = \mathcal{E}_j R_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ .

В этих условиях возникает двухуровневая оптимизационная дискретная задача назначения нормативных значений внутреннего ресурса ИОС по «I» задачам и распределение его в каждом маршруте диагностического контроля по «K» типам наиболее важных элементов РЭО – объектов диагностического контроля.

Введем необходимые переменные:

$x_{jk}^i$  – булева переменная, равная  $x_{jk}^i = 1$ , если для ПН в  $k$ -го типа  $i$ -го наиболее важной составной части (компоненты) РЭО в  $j$ -ом участке ДУП назначается заданное нормативное значение средств ПН, и  $x_{jk}^i = 0$ , если не назначается;

$y_j^i$  – булева переменная, равная  $y_j^i = 1$ , если средства ПН назначаются для решения задачи ПН в наиболее важных элементах  $i$ -ой составной части (компоненты) РЭО в  $j$ -ом участке ДУП,  $y_j^i = 0$ , если нет.

Так как цель применения ИОС состоит в достижении максимального значения (заданном уровне) результативности ПН, то в качестве критерия обоснованности способов ее применения целесообразным является использование максимального значения среднего количества выполненных задач ПН в иерархической структуре РЭО.

В этих условиях постановка задачи обоснования способов применения ИОС при заданных  $n_i$ ,  $V_{jk}^i$ ,  $R_j$  и  $\mathcal{E}_j$  состоит в обеспечении получения максимального количества выполненных задач ПН в наиболее важных разнотипных элементах РЭО.

Тогда целевую функцию можно записать в виде:

$$\{y^{opt}, x^{opt}\} = Arg \max_{\{y_j^i\}, \{x_{jk}^i\}} \sum_{i=1}^I \gamma_i P_i^{nh}(\{y_j^i\}, \{x_{jk}^i\}), \quad (1)$$

$$\gamma_i = n_i / \sum_{i \in I} n_i; \quad \sum_{i \in I} \gamma_i = 1,$$

при ограничениях

$$\sum_{k \in K} \mathcal{E}_{jk}^{oi} V_{jk}^i x_{jk}^i = \mathcal{E}_j^i; \quad \sum_{i \in I} \mathcal{E}_j^i y_j^i \leq \mathcal{E}_i K_j; \quad (2)$$

$$i \in I; \quad j \in J; \quad k \in K_j^i,$$

где  $P_j^{nh}(\dots)$  – средняя вероятность ПН в наиболее важных элементах РЭО как функции  $\{y_j^i\}$  плана назначения средств ПН (из  $n_i$ ) в  $j$ -ом участке ДУП и  $\{x_{jk}^i\}$  распределения ресурса средств ПН по  $k$ -го типа элементам;

$\mathcal{E}_j^i$  – количество средств ПН, назначаемых ИОС для поиска неисправностей в наиболее важных  $k$ -го типа элементах РЭО в  $j$ -ом участке ДУП;

$K_j^i$  – количество  $i$ -ых наиболее важных элементов РЭО в  $j$ -ом участке ДУП.

Задача (1), (2) является задачей дискретной оптимизации, для решения которой целесообразно использовать метод ветвей и границ [4] и процедуры поиска оптимальных решений, аналогичные алгоритмам [5]. При этом на первом (верхнем) уровне формируется алгоритм определения оптимального распределения средств поиска неисправностей ИОС в  $j$ -ом участке ДУП для обеспечения решения каждой  $i$ -ой задачи при произвольно заданном назначении средств ПН в любых других участках ДУП. При решении каждой такой задачи определяется распределение средств ПН по заданному количеству разнотипных наиболее важных элементов – объектов ПН в  $j$ -ом участке ДУП.

Поскольку назначение равного количества средств ПН для решения  $i$ -ой задачи не является равноэффективным, в связи с различным функциональным предназначением элементов РЭО – объектов ПН, эффективностью применяемых встроенных точек диагностического контроля, а также различной «важностью» элементов РЭО (назначением различного количеством средств ПН –  $n_i$ ), то решение задачи (1), (2) не является тривиальным.

Учитывая физическую трактовку задачи общий алгоритм ее решения можно определить следующим образом.

В качестве граничных оценок рассматривается совокупность целевых функций последовательного решения частных оптимизационных задач ПН для каждого  $j$ -го участка ДУП

$$\{y_j^{i\text{opt}}\} = \text{Arg max}_{\{y_j^i\}} \sum_{i=1}^I \gamma_i y_j^i P_j^{i\#} (\{y_l^i\}, \{x_{jv}^i\}, \{M_j^i\}), \quad (3)$$

при ограничениях

$$\sum_{i \in I} \mathcal{E}_j^i y_l^i \leq \mathcal{E}_j R_j; \quad \mathcal{E}_j^i = \sum_{v \in V} \mathcal{E}_{jv}^{oi} x_{jv}^i; \quad (4)$$

$$y_l^i, x_{jv}^i = 0 \vee 1; \quad \{y_l^i\} - \text{ задан для всех } j \neq l; \quad l \in J,$$

где  $P_j^{i\#}(\dots)$  – средняя по составу средств ПН ( $n_i$ ) вероятность решения  $i$ -ой задачи ПН с учетом назначения ИОС средств ПН в  $j$ -ом участке ДУП при заданных назначении встроенных точек диагностического контроля в других ( $l$ -ых,  $l \neq j$ ) участках ДУП и распределении средств ПН по объектам контроля  $\{x_{jv}^i\}$  в  $j$ -ом участке ДУП ( $\{M_j^i\}$ )

на  $R_j$  маршрутах диагностического контроля для решения каждой  $i$ -ой задачи;

$\{x_{jv}^i\}$  – план назначения  $i$ -ых средств ПН в каждом маршруте диагностического контроля по  $v$ -ым,  $v = \overline{1, V}$  по наиболее важным элементам РЭО в  $j$ -ом участке ДУП.

Значение вероятности  $P_j^{i\#}(\dots)$  определяется в виде

$$P_j^{i\#}(\{y_l^i\}, \{x_{jv}^i\}, \{M_j^i\}) = P_j^{i\text{mm}} + y_j^i \Delta P_j^{i\text{mm}}(\{y_l^i\}, \{x_{jv}^i\}, \{M_j^i\}), \quad (5)$$

где  $\Delta P_j^{i\text{mm}}(\dots)$  – приращение средней вероятности решения  $i$ -ой задачи ПН в элементах РЭО в  $j$ -ом участке диапазона при фиксированном (заданным произвольно) его назначении в других ( $l$ -ых,  $l \neq j$ ) участках ДУП и распределении в  $i$ -ой задаче  $\{x_{jv}^i\}$  средств ПН по  $v_j^i$ -ым наиболее важным элементам РЭО для каждого диапазона условий и от распределения количества встроенных средств диагностического контроля ( $M_j^i$ ).

Применение  $r_{ij}$  ИОС будет целесообразным только в том случае, когда приращение эффективности от ее применения превосходит значение  $\sum_{j=1}^J r_{ij} / n_i$ , т.е.

$$\Delta P_j^{i\text{mm}}(\|r_{ij}\|_J, \{V_{jk}^i\}) > \sum_{j=1}^J r_{ij} / n_i; \quad i \in I; \quad j \in J$$

В этом и состоит свойство не убывания целевой функции  $P_j^{i\#}(\dots)$ .

Для решения задач (3) - (5) возможно использование метода максимального элемента [5], реализующего достаточно простые алгоритмы распределения ресурса средств ПН по маршрутам диагностического контроля и назначения количества средств ПН по элементам РЭО в каждом маршруте. В качестве элемента назначения в ИОС используется средство ПН, последовательно назначаемое по  $i$ -ым задачам и определяется значение  $i^*$ , для которого обеспечивается

$$i^* = \text{Arg max}_{\{i\}} \Delta P_j^{i\#}(\dots); \quad j \in J; \quad i \in I, \quad (6)$$

для различных вариантов  $\{x_{jv}^i\}$  плана назначения средств ПН в каждом  $v = \overline{1, V}$  маршруте диагностического контроля в условиях действия ограничений:

$$\sum_{i \in I} y_j^i = \mathcal{E}_j^i R_j; \quad j \in J,$$

где  $\mathcal{E}_j^i$  – количество одновременно обслуживаемых маршрутов диагностического контроля (из  $R_j$ ) ИОС в  $j$ -ом участке ДУП;

$\Delta P_j^{i\bar{i}}(\dots) \geq \varepsilon$ , где  $\Delta \varepsilon$  – заданная величина приращения вероятности ПН в структуре РЭО за счет назначения ИОС средств ПН в  $j$ -ом участке ДУП, меньше которой его назначение для решения  $i$ -ой задачи является нецелесообразным.

Последнее ограничение определяется при решении задач технико-экономической целесообразности использования внутренних ресурсов ИОС, приведенных в [1, 6].

Исходя из этого, при решении задачи распределения внутреннего ресурса ИОС по маршрутам диагностического контроля и наиболее важным элементам РЭО могут быть определены: относительная важность диагностируемых элементов РЭО и средние значения назначаемых ресурсов средств ПН, которые далее могут быть использованы в математических моделях оценки эффективности применения различных вариантов ИОС.

## МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определим исходя из (4) состояния РЭО с заданной на нем вероятностной мерой пронумеровав все элементы РЭО в определенной последовательности от 1 до  $n$  и поставив каждому из них в соответствие 0 или 1 в зависимости от того, исправен он или нет. Это позволяет получить числовую последовательность, которая будет количественно описывать состояние РЭО. Всего таких состояний (последовательностей) будет  $2^n$ . Все множество состояний  $S$  можно рассматривать как пространство элементарных событий  $S_k \in S$ ,  $k = \overline{1, 2^n}$ , каждое из которых может наступить в процессе эксплуатации РЭО в течение определенного времени в предположении, что отказ одного из элементов не влияет на вероятность отказа других, с вероятностью, равной

$$p(S_k) = \prod_{j \in J} p_j \prod_{i \in I} (1 - p_i) \quad (7)$$

где  $p_j$  – вероятность отказа  $j$ -го элемента РЭО;

$I$  – множество номеров элементов, которые неисправны;

$J$  – множество номеров исправных элементов.

В общем случае качество работы ЛПР по ПН можно учесть по результатам анализа неисправных / исправных состояний элементов РЭО, которые в соответствии с теорией информации количественно определяются на основе энтропии его состояний, то есть нахождения приращения  $\Delta P_j^{i\bar{i}}(\dots)$  за счет введения дополнительных точек контроля. В математическом смысле энтропия представляет в этом случае логарифм числа доступных состояний исправности РЭО в процессе эксплуатации, вскрываемых ЛПР. При этом если состояния исправности РЭО вскрыв-

аются ЛПР по степени доступности (не равновероятно), то энтропия числа состояний в виде их эффективного количества представляется зависимостью [7]

$$H = \log \bar{N} = - \sum_{i=1}^N \log(1/p_i), \quad (8)$$

где  $p_i$  – вероятность состояния РЭО;  $\bar{N}$  – количество состояний РЭО.

Из (8) следует, что множеству исправных / неисправных состояний РЭО требуется адекватное им установление соответствующего множества  $N$  решений ЛПР по методам (процедурам) и средствам поиска неисправностей. Если же они отсутствуют, что является результатом отсутствия / искажения информации или наличия ошибок о реальном состоянии РЭО в процессе его диагностического анализа ЛПР, то решение отсутствует. Исходя из этого, процесс поиска неисправностей ЛПР заключается в снижении числа неконтролируемых состояний РЭО. Для определения предельных возможностей ЛПР по поиску  $Y$  неисправностей в РЭО, т.е. уменьшения энтропии  $H(Y/X)$ , используется зависимость:

$$H(Y/X) = H(Y) - H(X) + H(X/Y), \quad (9)$$

из которой следует, что для обеспечения повышения показателя эффективности поиска неисправностей в РЭО требуется: уменьшать число  $H(Y)$  неопределенных состояний РЭО; увеличивать множество  $H(X)$  диагностических проверок ЛПР, приближая их к множеству  $H(Y)$  состояний РЭО и снижать неоднозначность диагностических процедур поиска неисправностей ЛПР относительно  $H(X/Y)$  состояний РЭО, что возможно только при наличии полной (полученной) информации о нем. Это позволяет определить требования к энтропии вскрытия состояний РЭО, которая должна удовлетворять условию  $H(Y/X) \geq H(Y) - H(X)$ , характеризующем предельные возможности ЛПР по поиску неисправностей его РЭА. Достижение же равенства возможно при условии достижения однозначного соответствия решений по поиску неисправностей ЛПР оцениваемым состояниям РЭО. Исходя из этого, обоснованность принимаемых решений диагностического контроля ЛПР по степени их соответствия состояниям РЭО можно представить в виде:

$$H(X)_{mp} = \max H(X) \geq H(Y), \quad (10)$$

определяющем, что требуемая энтропия процесса поиска неисправностей ЛПР должна быть не меньше энтропии состояний РЭО.

На практике случайные отклонения состояний и характеристик РЭО не поддаются точному определению ЛПР, погрешности возникают также при выработке им корректирующих решений и при их исполнении на радиоэлек-

тронной аппаратуре (РЭА). В силу этого однозначная связь между решениями ЛПР и состояниями РЭО отсутствует и условная энтропия  $H(X/Y)$  больше нуля. Это приводит к необходимости структуризации области применения РЭО и определения характерных условий их эксплуатации.

Анализ нормативно-технической документации по эксплуатации РЭО показывает, что в каждой предметной области к их применению задаются определенные количественные уровни их безотказной работы – исправности. В качестве количественного показателя эффективности диагностического анализа состояний РЭО исходя из (5) и (8) рассматривается приращение эффективности решения задачи ПН в иерархической структуре элементов РЭО, определяемой зависимостью

$$\Delta P = \frac{I(S, H)}{H(S)},$$

где  $H(S)$  – неопределенность состояния РЭО, равная количеству информации, которое необходимо получить при определении, в каком конкретном состоянии он находится, равная

$$H(S) = -\sum_{k=1}^{2^n} p(S_k) \log p(S_k),$$

где  $I(S, H)$  – количество информации, которое в среднем доставляет результат диагностического анализа состояний РЭО, рассчитываемое по формуле

$$I(S, H) = H(Y) - H(Y/S),$$

где  $H(Y)$  – неопределенность исхода диагностического анализа состояний РЭО, определяемая в виде

$$H(Y) = -\sum_{y_i \in Y} p(y_i) \log p(y_i).$$

Условная неопределенность исхода диагностического анализа  $H(Y/S) = 0$ , поскольку неопределенность появления  $Y_i$  при заданном состоянии РЭО  $S_k \in S$  равна нулю. Отсюда  $I(S, H) = H(Y)$  и значение приращения эффективности ПН, будет определяться отношением

$$\Delta P = \frac{H(Y)}{H(S)}.$$

Поскольку состояния отдельных элементов РЭО считаются статистически независимыми, то энтропия его состояний равна сумме энтропий отдельных элементов:

$$H(S) = \sum_{j=1}^n H(X_j)$$

где  $X_j$  – множество состояний  $j$ -го элемента РЭО, состоящее из нуля и единицы;

$H(X_j)$  – энтропия состояний  $j$ -го элемента РЭО, рассчитываемая в виде:

$$H(X_j) = -p_j \log p_j - (1 - p_j) \log(1 - p_j).$$

Для точного определения состояния РЭО необходимо, чтобы количество информации, которое в среднем получается в результате диагностического анализа состояний РЭО, определялось как  $I(S, Y) = H(S)$ . В этом случае значение приращения вероятности ПН будет равно  $\Delta P = 1$ . В случае невозможности получения информации о состоянии РЭО,  $I(S, Y) = 0$  и эффективность ПН  $\Delta P = 0$ . Результаты расчетов показывают, что применение дополнительных программно-аппаратных точек контроля обеспечивает повышение на 10–30% эффективность поиска неисправностей в РЭО.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов распределения точек дополнительного контроля по элементам РЭО возможно осуществить оптимальное с точки зрения диагностического анализа их количество, позволяющее локализовать отказы с точностью до выделенной структурной единицы РЭО. При некотором количестве точек контроля практически отсутствует пересечение подмножеств элементов, которые соответствуют различающимся  $y_i$ . С увеличением количества точек контроля структурные единицы РЭА становятся более мелкими, а их количество растет. Поэтому количество точек контроля выбирается из условия получения наиболее эффективного и удобного с практической точки зрения распределения элементов РЭО по структурным единицам и возможностям применения различных средств технической диагностики – встроенных, аппаратно-программных и внешних.

Прирост эффективности контроля  $\Delta P$  на основе применения дополнительных точек контроля, определяемых в виде  $P = P_0 + \Delta P$ , где  $P_0 \rightarrow const$  представляет базовую вероятность эффективности системы контроля РЭО, задаваемую заводом-изготовителем. При фиксированном значении  $P_0$  вероятности поиска неисправности с помощью встроенных точек контроля  $P$  прирост эффективности  $\Delta P$  достигается введением дополнительных точек контроля для одиночных, групповых и кратных неисправностей, что раньше не учитывалось.

На основе морфологического анализа структуры элементов РЭО, верификации и систематизации типовых и характерных неисправностей РЭА определяются маршруты поиска сложных одиночных, групповых и кратных неисправностей, обеспечивающих учет влияния числа маршрутов и средств поиска неисправностей от степени их перекрытий по функциональным элементам и их взаимосвязям в структуре РЭО.

Обоснование маршрутов поиска неисправностей осуществляется на основе структурно-алгоритмических связей функционирования РЭО с учетом важности, функцио-

нальности и частности, зависящих от условий применения средств РЭО.

В настоящее время не представляется возможным полностью автоматизировать процесс поиска неисправностей вследствие структурности и иерархичности и неявности их проявления, что требует для задач поиска неисправности дополнительного применения типовой контрольно-измерительной аппаратуры на основе известных алгоритмов поиска неисправностей с учетом особенностей функционирования элементов РЭО.

#### Список использованных источников и литературы

1. Мистров Л.Е. Метод синтеза информационно-обучающих систем (тренажеров) поиска неисправностей в радиоэлектронных объектах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19, №1. С. 14–35.
2. Мистров Л.Е., Белоцерковский О.А. Модель формирования вариантов решений в информационно-обучающих системах по поиску неисправностей в сложных радиоэлектронных объектах // Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19, №2. С. 28–35.
3. Мистров Л.Е., Белоцерковский О.А. Основы синтеза информационно-обучающих систем поиска и устранения неисправностей в радиоэлектронных объектах // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2020. № 2 (54). С. 16–24.
4. Ковалев М.М. Дискретная оптимизация. Целочисленное программирование. – М.: URSS, 2023. – 192 с.
5. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем. – М.: Советское радио, 1974. – 304 с.
6. Мистров Л.Е. Метод технико-экономического обоснования оптимального состава обеспечивающей организационно-технической системы // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6, № 12. С. 91–106.
7. Спицнадель В.Н. Основы системного анализа: учебное пособие. – СПб.: Бизнес-пресса, 2000. – 326 с.

# METHOD OF SUBSTANTIATION OF ADDITIONAL POINTS FOR DIAGNOSTIC ANALYSIS OF THE SERVICEABILITY OF COMPLEX RADIO-ELECTRONIC OBJECTS

**Mistrov L.E.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of the VUNTS Air Force "VVA" (Voronezh), Central Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "The Russian State University of Justice", Chief Specialist, Russian Standardization Institute

**Belotserkovsky O.A.**, VUNTS Air Force "VVA" (Voronezh), teacher of the department

*The basis for the construction of information and training systems (ITS) for the training of diagnostic specialists for equipment of complex radioelectronic objects (REO) and troubleshooting are methods of localization of elementary, group and multiple (dependent) faults. Due to the fact that the built-in control points do not allow in practice to apply methods of statistical analysis and forecasting of the technical conditions of REO, the task arises of substantiating additional control points by solving two groups of typical optimization subtasks.*

*The first group is related to the distribution of the allocated resource of troubleshooting facilities along the routes of diagnostic control of the most important elements of REO, and the second group is the optimal distribution of the number of troubleshooting facilities among the control elements of the specified sections of the range of conditions for the use of functional parts (subsystems) of REO. The difficulties of solving these optimization problems are as follows: a) the use of ITS provides a simultaneous solution to the search for group and multiple faults, taking into account the results of the effectiveness of the built-in control points; b) the number of means of group and multiple faults is limited by the effectiveness of the means of searching for elementary faults.*

*The solution to this problem of optimal distribution of ITS resource among the most important elements of REO is carried out on the basis of branch and bound methods, maximum element and procedures for finding optimal solutions. At the same time, the indicator of the efficiency of resource distribution of troubleshooting funds in the ITS is based on the increase in the average probability of solving troubleshooting problems, based on the ratio of the amount of information that needs to be obtained about the state of the electronic equipment to the amount of information that is obtained as a result of diagnostic control. This made it possible, based on the distribution of additional control points, to optimize their number for localizing faults with an accuracy of the selected structural unit of the electronic equipment.*

**Keywords:** radio-electronic object, types of faults, information and training system, technical diagnostics, additional control points, software and hardware troubleshooting tools, optimization of tools.

**For citation:** Mistrov L.E., Belotserkovsky O.A. Method of substantiation of additional points for diagnostic analysis of the serviceability of complex radio-electronic objects. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2024. 4 (79): 33–40. (In Russ.).

## References

1. Mistrov L.E. Metod sinteza informacionno-obuchayushchih sistem (trenazherov) poiska neispravnostej v radioelektronnyh ob"ektah. Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy, 2021, vol. 19, no. 1, pp. 14–35.
2. Mistrov L.E., Belotserkovsky O.A. Model' formirovaniya variantov reshenij v informacionno-obuchayushchih sistemah po poisku neispravnostej v slozhnyh radioelektronnyh ob"ektah. Naukoemkie tekhnologii, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 28–35.
3. Mistrov L.E., Belotserkovsky O.A. Osnovy sinteza informacionno-obuchayushchih sistem poiska i ustraneniya neispravnostej v radioelektronnyh ob"ektah. Informacionno-ekonomicheskie aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya, 2020, no. 2 (54), pp. 16–24.
4. Kovalev M.M. Diskretnaya optimizaciya. Celochislennoe programmirovaniye. Moscow: URSS Publ., 2023, 192 p.
5. Berzin E.A. Optimal'noye raspredeleniye resursov i elementy sinteza sistem. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1974, 304 p.
6. Mistrov L.E. Metod tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya optimal'nogo sostava obespechivayushchej organizacionno-tekhnicheskoy sistemy. Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy, 2008, vol. 6, no. 12, pp. 91–106.
7. Spitsnadel V.N. Osnovy sistemnogo analiza: uchebnoye posobie. Saint-Petersburg: Biznes-pressa publ., 2000, 326 p.