

Многокритериальная оптимизация контролепригодности диагностических систем в условиях нечеткого состояния технического объекта

М.Е.Бушуева¹, В.В.Беляков²

*Нижегородский государственный технический университет
ул. Минина 24, Нижний Новгород, 603600, Россия*

В работе рассматриваются теоретические аспекты многокритериального проектирования диагностических систем технических объектов и их структурных взаимосвязей, подвергшихся некорректному внешнему воздействию и находящихся в нечетком состоянии. В связи с этим, повышение качества функционирования и определение действительного технического состояния изделий (объектов, систем) является важной проблемой, от правильного решения которой зависит эффект их использования. В обеспечении требуемого уровня качества функционирования и надежности сложных технических систем особая роль принадлежит методам технического диагностирования. В диагностике технических систем нередко проявляются дефекты, при которых связь между признаками и причинами неисправностей носит неоднозначный характер, что приводит к нечеткости процесса диагностирования. Для решения таких задач диагностирования на практике были разработаны альтернативные методы поиска дефектов. Эти методы основаны на базе математического аппарата нечетких множеств и логик, позволяющих реализовать методику функционирования программно-алгоритмических инструментов поиска дефектов.

Работа является логическим продолжением исследований, представленных авторами в [2–4]. Приведенные в работе методы и алгоритмы обладают высокой степенью универсальности и могут быть использованы в любых областях науки и техники, где требуются надежная диагностика и контроль работоспособности технических объектов, систем или изделий, подвергшихся некорректному внешнему воздействию.

1. Введение

В диагностике технических систем, подвергшихся некорректному внешнему воздействию, нередко проявляются дефекты, при которых связь между признаками и причинами неисправностей носит неоднозначный характер. Простые двузначные утверждения типа «исправный-1» – «неисправный-0» недостаточны, поскольку современные диагностические системы должны распознавать опасные условия функционирования, причины и тип возникшей неисправности, четкое и однозначное описание которой невозможно.

Профессор Д. Баршдорф (D.Barschdorff) [5] пишет, что важным шагом в любом методе диагностики отказов является построение математической модели, дающей адекватную информацию о функционировании системы. Диагностирование неисправностей системы при помощи детерминистических методов распознавания

¹ Тел.: +7 8312 368344, E-mail: bushueva@nntu.nnov.ru

² Тел.: +7 8312 365672, E-mail: maximov@nntu.nnov.ru

дефектов эффективно только при наличии математической модели ее функционирования или процесса. Эти модели в большинстве случаев решаемы с использованием численных методов, что накладывает ограничение на их использование в реальном времени при поиске неисправностей и управлении технической системой. Почти все реальные процессы функционирования технических систем имеют нелинейное поведение, для них характерно возникновение нештатных ситуаций. Эти ситуации сопряжены с нечеткостью поступающей диагностической информации. В этих случаях на практике используют экспертов, то есть происходит вмешательство человека в процесс диагностирования и управления технической системой. Исключение человека из процесса управления или поиска дефектов в таких условиях возможно с использованием методов нечеткой логики, позволяющих обрабатывать данные и делать заключения на основе рассеянных, неточных, разбросанных и неполных знаний. В данной работе представляются исходные предпосылки построения таких диагностических систем, предлагается метод их многокритериального проектирования. Данная работа является логическим продолжением исследований, начатых в [2–4].

Программа НАТО Наука для Мира «Разработка радиационно-стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа» напрямую направлена на повышение надежности сложных полупроводниковых объектов, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. В связи с этим проблема обеспечения контролепригодности технических объектов, подвергшихся внешнему некорректному воздействию, является весьма актуальной. Рассматриваемые в работе методы и алгоритмы обеспечения контролепригодности, особенно при кратных дефектах и нечеткой информации в объекте, являются частью общей проблемы обеспечения контролепригодности технических систем.

2. Нечеткие множества

Аппарат нечетких множеств применяется для решения задач, в которых исходные данные являются ненадежными и слабо формализованными. Толчком к развитию новой метаматематической теории явилась опубликованная в 1965 г. работа L.Zadeh «Fuzzy Sets», в которой он расширил классическое понятие множества, допустив, что характеристическая функция (функция принадлежности элемента множеству) может принимать любые значения в интервале $(0;1)$, а не только 0 или 1. Такие множества были названы им нечеткими (fuzzy). В 1993 г В.Kosko доказал теорему «Fuzzy Approximation Theorem», согласно которой *любая математическая система может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике*. Согласно [1], сильными сторонами применения математического подхода, основанного на нечетких множествах и нечетких логиках, являются: описание условий и метода решения задачи на языке, близком к естественному; универсальность и эффективность. Вместе с тем, имеются характерные недостатки: исходный набор постулируемых нечетких правил формируется экспертом и может оказаться неполным или противоречивым; вид и параметры функции принадлежности, описывающие входные и выходные переменные системы, выбираются субъективно, и могут оказаться недостаточно адекватно отражающими реальную действительность.

Функция принадлежности и нечеткие множества, согласно [1], определяются при условии, что задано универсальное множество E с элементами $x \in E$, а также некоторое свойство S , определяющее принадлежность элементов к множеству, тогда:

Определение 1. Если подмножество $A \subset E$ и определяется как множество упорядоченных пар $A = \{(x, \mu_A(x))\}$, а его элементы $x \in E$, удовлетворяющие свойству S , принимают значения $\{(x, 1)\}$ и $\{(x, 0)\}$, то множество A является **четким**.

Определение 2. Если подмножество $\tilde{A} \subset E$ и определяется как множество упорядоченных пар $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x))\}$, а его элементам $x \in E$ нельзя дать однозначного ответа $[1, 0]$ относительно свойства S о принадлежности к подмножеству $\tilde{A}$, то есть характеристическая функция $\mu_{\tilde{A}}(x)$ для $\forall x \in E$ принимает значения $0 < \mu_{\tilde{A}}(x) < 1$, то множество $\tilde{A}$ является **нечетким**.

Определение 3. Функция $\mu_A(x)$, принимающая значения в некотором упорядоченном множестве M ($M = \{0, 1\}$) относительно свойства S и указывающая степень (уровень) принадлежности элемента $x \in E$ к подмножеству A или $\mu_{\tilde{A}}(x)$, принимающая значения в некотором упорядоченном множестве M ($M = [0, 1]$) относительно свойства S и указывающая степень (уровень) принадлежности элемента $x \in E$ к подмножеству $\tilde{A}$ называется **характеристической функцией принадлежности**.

Определение 4. Пусть $\alpha \in [0, 1]$; Подмножеством **α - уровня** нечеткого подмножества $\tilde{A}$ называется обычное **четкое** множество A_α , где $A_\alpha = \{x / \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}$, $\forall x \in E$

Понятие графа играет немаловажную роль в приложениях математики, поэтому стоит обобщить его на случай нечетких множеств.

Определение 5. Пусть существуют два множества E_1, E_2 , причем $x \in E_1, y \in E_2$. Множество упорядоченных пар (x, y) определяет декартово произведение $E_1, \otimes E_2$.

Нечеткое множество $\tilde{G}$, такое, что $\forall (x, y) \in E_1, \otimes E_2: \mu_{\tilde{G}}(x, y) \in M$, где M – множество принадлежностей элементов множества $E_1, \otimes E_2$, называется **нечетким графом**.

Основные характеристики нечетких множеств и операции над нечеткими множествами, а также методы построения функций принадлежности подробно изложены в работе [1].

3. Постановка задачи

Применим теорию нечетких множеств для решения задачи диагностирования сложной технической системы.

Пусть объект диагностирования задан в виде *нечеткого упорядоченного графа* $\tilde{G}(V, U)$ с n вершинами, где V и U – соответственно множества *вершин* и *ребер*. Вершинам графа $\tilde{G}(V, U)$ ставятся в соответствие блоки объекта диагностирования, а ребрам – связи между блоками. Причем, связи между блоками обладают определенным уровнем устойчивости (степенью принадлежности) $\mu_{\tilde{G}}(v_i, v_j)$ ($\mu_{\tilde{G}}(v_i, v_j) \in [0, 1], v_i \in V, v_j \in V$). Известно множество $Y(|Y| = y)$ точек контроля, обусловленных назначением и конструкционным исполнением объекта диагностирования. Из множества $V(|V| = n)$ выделяется подмножество $P(P \subset V, |P| = n - y)$. Каждой точке $p_k \in P$ ставится в соответствие стоимость $c(p_k)$ ($k = 1, n - y$) ее реализации. При этом задано число z дополнительных организуемых точек контроля. Требуется дополнить множество Y точек контроля множеством $Z^*(Z^* \subset P, |Z^*| = z)$ так, чтобы на множестве $Y \cup Z^*$ коэффициент глубины поиска дефекта любой кратности стремился к максимуму, а стоимость реализации назначенных точек контроля была минимальной.

Тогда математическая постановка задачи имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{г.п}}(Z^* \cup Y) &= \max_{Z \subset P} K_{\text{г.п}}(Z \cup Y), \\ C(Z^*) &= \min_{Z \subset P} C(Z), \\ |Z| &= z, \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $C(Z) = \sum_{k \in Z} c(p_k)$ – стоимость реализации множества Z точек контроля объекта диагностирования.

4. Решение задачи

Рассматриваемая задача относится к классу *многокритериальных задач*. Для ее решения можно использовать метод свертывания векторного критерия, который подробно рассматривался в [2]. Этот метод оптимизации учитывает относительную важность частных критериев оптимальности с помощью построения скалярной функции F , являющейся обобщенным критерием оптимальности. Функция F с аддитивным критерием оптимальности имеет вид:

$$F_{\Sigma}(w, Q(x)) = \sum_{i=1}^2 w_i Q_i(x), \quad (2)$$

где $Q(x) = \{Q_1(x), Q_2(x)\}$ – вектор частных критериев, причем $Q_1(x)$ соответствует нормированному коэффициенту глубины поиска дефекта любой кратности ($N_K(Y \cup Z)$), $Q_2(x)$ соответствует нормированной стоимости реализации дополнительных точек контроля ($N_C(Z)$); $w = \{w_1, w_2\}$ – весовые коэффициенты относительной важности частных критериев, которым при решении предлагается дать точные численные оценки.

Для нормирования частных критериев примем одинаковую шкалу измерения $[\alpha, \beta]$. При этом $[\alpha, \beta] = [1, 2]$ для $K_{г.п}(Y \cup Z)$ и $[\alpha, \beta] = [2, 1]$ для $C(Z)$. В результате, для нормирования $K_{г.п}(Y \cup Z)$ получаем следующую формулу:

$$N_K(Y \cup Z) = \frac{K_{г.п}(Y \cup Z) - \min_{Z \subset P} K_{г.п}(Z \cup Y)}{\max_{Z \subset P} K_{г.п}(Z \cup Y) - \min_{Z \subset P} K_{г.п}(Z \cup Y)} (\beta - \alpha) + \alpha. \quad (3)$$

Для нормирования $C(Z)$:

$$N_C(Z) = \frac{C(Z) - \min_{Z \subset P} C(Z)}{\max_{Z \subset P} C(Z) - \min_{Z \subset P} C(Z)} (\beta - \alpha) + \alpha. \quad (4)$$

В результате, задача сводится к решению *однокритериальной задачи* оптимизации:

$$F(w, Q(Y \cup Z)) = \max_{Z \subset P} F(w, Q(Y \cup Z)) = \max_{Z \subset P} \{w_1 N_K(Y \cup Z) + w_2 N_C(Z)\}, \quad (6)$$

Полученная задача является задачей *дискретной оптимизации*, которую можно решить с помощью *метода ветвей и границ*.

Решение задачи для объекта диагностирования, заданного в виде упорядоченного (четкого) графа $G(V, U)$, подробно было рассмотрено в [3]. Отличительная особенность решения подобной задачи с использованием нечеткого упорядоченного графа $\tilde{G}(V, U)$ – в нахождении коэффициента глубины поиска дефекта любой кратности на определенном множестве точек контроля.

Расчет коэффициента глубины поиска дефекта любой кратности с использованием нечетких множеств производится по следующей формуле [3]:

$$K_{г.п} = F_n(Y) / S_n, \quad (7)$$

где $S_n = 2^n - 1$ – общее число возможных дефектов кратности от 1 до n , $F_n(Y)$ – число однозначно различимых дефектов любой кратности на множестве точек контроля Y .

Определение 6. Дефект называется однозначно различимым на множестве точек контроля Y , если он может быть обнаружен в системе без введения дополнительных точек контроля.

Рассматриваемый нечеткий упорядоченный граф $\tilde{G}(V, U)$ можно представить в следующем виде:

$$\tilde{G} = \{((v_i, v_j) | \mu_{\tilde{G}}(v_i, v_j)) / v_i \in V, v_j \in V\},$$

при этом для решения поставленной задачи необходимо задать минимальный уровень устойчивости связи α (α -уровень) графа $\tilde{G}(V, U)$.

Далее для определения $F_n(Y)$ будем использовать следующий алгоритм:

1) По графу $\tilde{G}(V, U)$ строим матрицу достижимости $\mathbf{D}$, исходя из правил построения пути в нечетком конечном графе [1].

2) Строим матрицу проверок $\tilde{\mathbf{B}}_Y$, элементы которой представляют из себя нечеткое множество. Для того, чтобы получить множество, определяющее вектор-строку матрицы проверок $b(i, j)$ ($i < j$), необходимо в матрице достижимости взять нечеткое множество, определяемое строкой под номером i и нечеткое множество, определяемое столбцом под номером j , а затем найти их пересечение [1]. Таким образом строятся все вектор-строки матрицы проверок $\tilde{\mathbf{B}}_Y$.

3) Определим матрицу $\mathbf{B}'_Y$, которая будет содержать обычное (четкое) множество, состоящее из 0 и 1 и являющееся α -уровнем нечеткого множества матрицы $\tilde{\mathbf{B}}_Y$ (α -уровень или уровень устойчивости связи был определен заранее).

4) Из матрицы $\mathbf{B}'_Y$ вычеркиваем столбцы, состоящие только из нулей, в результате будет получена матрица $\mathbf{B}_Y$.

5) В матрице $\mathbf{B}_Y$ выбираются столбцы, определяющие данный дефект.

6) Из матрицы $\mathbf{B}_Y$ вычеркиваются строки, которые не имеют единиц в выбранных столбцах, а затем вычеркиваются столбцы, имеющие единицы в этих строках.

7) Если из матрицы $\mathbf{B}_Y$ вычеркнуты все столбцы, кроме определяющих рассматриваемый дефект, тогда исследуемый дефект называется *однозначно распознаваемым*, в противном случае исследуемый дефект не является однозначно распознаваемым.

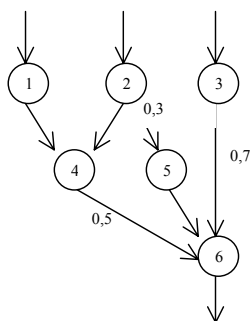
8) Подобным образом (п. 5-7) последовательно рассматриваем все предполагаемые дефекты. Количество однозначно распознаваемых дефектов определит $F_n(Y)$.

Используя вышеприведенный алгоритм и формулу (7), можно определить $K_{гп}$ на любом множестве точек контроля и использовать для решения поставленной задачи.

5. Пример

В качестве примера многокритериальной оптимизации в задаче диагностики сложных технических систем рассмотрим объект, модель которого представлена в форме нечеткого упорядоченного графа $\tilde{G}(U, V)$, показанного на рисунке

$$\tilde{G} = \{((1,4)|1), ((2,4)|1), ((2,5)|0,3), ((3,6)|0,7), ((4,6)|0,5), ((5,6)|1)\}.$$



Известно исходное множество $Y = \{6\}$ точек контроля. Задано число $z=2$ дополнительных организуемых точек контроля, так же заданы стоимости реализации точек, претендующих на дополнительные точки контроля.

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
5 ед.	7 ед.	6 ед.	8 ед.	4 ед.

По графу построим матрицу достижимости D :

$$D = \begin{array}{c|cccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & 1 & & & & & 0,5 \\ 2 & & 1 & & 1 & 0,3 & 0,5 \\ 3 & & & 1 & & & 0,7 \\ 4 & & & & 1 & & 0,5 \\ 5 & & & & & 1 & 1 \\ 6 & & & & & & 1 \end{array}$$

На множестве $Y = \{6\}$ построим матрицу проверок $\tilde{B}_Y$

$$\tilde{B}_Y = \begin{array}{c|cccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline b(1,6) & 0,5 & & & 0,5 & & 0,5 \\ b(2,6) & & 0,5 & & 0,5 & 0,3 & 0,5 \\ b(3,6) & & & 0,7 & & & 0,7 \end{array}$$

Определим величину общего числа возможных дефектов кратности от 1 до n ($n=6$)

$$S_n = 2^n - 1 = 63$$

Определим минимальный уровень устойчивости связи (α -уровень) $\alpha = 0,5$, и построим матрицу B'_Y

$$B'_Y = \begin{array}{c|cccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline b(1,6) & 1 & & & 1 & & 1 \\ b(2,6) & & 1 & & 1 & & 1 \\ b(3,6) & & & 1 & & & 1 \end{array}$$

Исключим 5 столбец и получим матрицу B_Y

$$B_Y = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 6 \\ \hline b(1,6) & 1 & & & 1 & 1 \\ b(2,6) & & 1 & & 1 & 1 \\ b(3,6) & & & 1 & & 1 \end{array}$$

Используя вышеприведенный алгоритм по матрице $\mathbf{B}_Y$ рассматриваемого примера, получим следующие однозначно выявляемые дефекты: $b_1, b_2, b_3, b_1 \vee b_3, b_2 \vee b_3$. При этом $K_{\text{гп}}(Y) = F_n(Y) / S_n = 5 / 63 = 0,079$.

Из множества точек $P = \{1, 2, 3, 4\}$ необходимо выбрать две точки, при которых $K_{\text{гп}}$ максимален, а стоимость их реализации минимальна.

Шаг первый

За оценку на данном шаге принимаем выражение:

$$F(w, Q(Y \cup Z_{1j})) = \max_{Z_{1j} \in P} \{F(w, Q(Y \cup Z_{1j}))\} = \max_{Z_{1j} \in P} \{0,7N_k(Y \cup Z_{1j}) + 0,3N_c(Z_{1j})\}. \quad (8)$$

При этом $Y \cup Z_{11} = \{1, 6\}$, $Y \cup Z_{12} = \{2, 6\}$, $Y \cup Z_{13} = \{3, 6\}$, $Y \cup Z_{14} = \{4, 6\}$.

Определим $K_{\text{гп}}(Y \cup Z_{1j})$ и $N_k(Y \cup Z_{1j})$ ($j = \overline{1,4}$) для полученных множеств точек контроля, исходя из формул, предложенных выше (7), (3):

$$\begin{aligned} K_{\text{гп}}(Y \cup Z_{11}) &= 0,095; N_k(Y \cup Z_{11}) = 2; \\ K_{\text{гп}}(Y \cup Z_{12}) &= 0,095; N_k(Y \cup Z_{12}) = 2; \\ K_{\text{гп}}(Y \cup Z_{13}) &= 0,079; N_k(Y \cup Z_{13}) = 1; \\ K_{\text{гп}}(Y \cup Z_{14}) &= 0,095; N_k(Y \cup Z_{14}) = 2. \end{aligned}$$

Определим $N_c(Z_{1j})$, ($j = \overline{1,4}$), используя заданную стоимость реализации точек, претендующих на дополнительные точки контроля по формуле (4):

$$\begin{aligned} N_c(Z_{11}) &= 1,75; \\ N_c(Z_{12}) &= 1,25; \\ N_c(Z_{13}) &= 1,5; \\ N_c(Z_{14}) &= 1; \end{aligned}$$

Подставляя значения нормированных коэффициентов в выражение (8), определим значения обобщенных критериев оптимальности $F(w, Q(Y \cup Z_{1j}))$ ($j = \overline{1,4}$).

$$\begin{aligned} F(w, Q(Y \cup Z_{11})) &= 1,93; \\ F(w, Q(Y \cup Z_{12})) &= 1,78; \\ F(w, Q(Y \cup Z_{13})) &= 1,15; \\ F(w, Q(Y \cup Z_{14})) &= 1,7; \\ F(w, Q(Y \cup Z_1)) &= 1,93 \end{aligned}$$

и первой дополнительной точкой контроля является элемент, соответствующий вершине 1.

Шаг второй

За оценку на втором шаге принимаем выражение

$$F(w, Q(Y \cup Z_2)) = \max_{Z_{2j} \in P} \{F(w, Q(Y \cup Z_{2j}))\} = \max_{Z_{2j} \in P} \{0,7N_k(Y \cup Z_{2j}) + 0,3N_c(Z_{2j})\}, \quad (9)$$

где $Y \cup Z_{21} = \{1, 2, 6\}$, $Y \cup Z_{22} = \{1, 3, 6\}$, $Y \cup Z_{23} = \{1, 4, 6\}$.

Для каждого из этих множеств определим $K_{\text{гн}}(Y \cup Z_{2j})$, $N_k(Y \cup Z_{2j})$, $N_c(Z_{2j})$ ($j = \overline{1,3}$) по формулам (7), (3), (4)

$$\begin{aligned} K_{\text{гн}}(Y \cup Z_{21}) &= 0,143; N_k(Y \cup Z_{21}) = 2; N_c(Z_{21}) = 1; \\ K_{\text{гн}}(Y \cup Z_{22}) &= 0,095; N_k(Y \cup Z_{22}) = 1; N_c(Z_{22}) = 1,33; \\ K_{\text{гн}}(Y \cup Z_{23}) &= 0,111; N_k(Y \cup Z_{23}) = 1,33; N_c(Z_{23}) = 2. \end{aligned}$$

Определим значения обобщенных критериев оптимальности $F(w, Q(Y \cup Z_{2j}))$ ($j = \overline{1,3}$) по формуле (9)

$$\begin{aligned} F(w, Q(Y \cup Z_{21})) &= 1,7; \\ F(w, Q(Y \cup Z_{22})) &= 1,1; \\ F(w, Q(Y \cup Z_{23})) &= 1,53; \\ F(w, Q(Y \cup Z_2)) &= 1,7 \end{aligned}$$

и второй дополнительной точкой контроля назначаем элемент, определяемый вершиной 2.

Таким образом, для выполнения условия задачи должно быть следующее множество точек контроля, $Y \cup Z = \{1, 2, 6\}$. При этом $K_{\text{гн}}(Y \cup Z) = 0,14$, $C_{\text{реал}}(Z) = 12$ ед.

6. Заключение

Из сравнения решения задач определения коэффициента глубины поиска дефекта любой кратности и стоимости введения дополнительных точек контроля для четкой задачи [2,3] и нечеткой задачи, рассмотренной в данной работе, видно, что решение задачи зависит от выбора уровня устойчивости связей α . Этот уровень зависит от величины некорректности внешнего воздействия на систему. При малых внешних воздействиях на техническую систему $\alpha \rightarrow 0$, и задача становится более четкой. С повышением внешнего некорректного воздействия $\alpha \rightarrow 1$, четкость задачи уменьшается. Так, в приведенном примере при $\alpha = 0,5$ из рассмотрения выпадает целая ветвь системы. Для распознавания дефектов необходимо повышать число точек контроля. В связи с чем, значительно возрастает стоимость диагностических систем. В рассмотренной задаче коэффициент глубины поиска невелик, при этом возможны случаи, когда дефекты не будут распознаны.

Приведенные в работе методы и алгоритмы обладают высокой степенью универсальности. Они могут быть использованы в любых областях науки и техники, где требуются надежная диагностика и контроль работоспособности технических объектов, систем или изделий, подвергшихся некорректному внешнему воздействию.

Работа выполнена при частичной поддержке Отделения Науки НАТО, программа «Наука для Мира», грант SfP-973799 Semiconductors.

Литература

- [1] Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. –М.: Радио и связь, 1982, 431с.
- [2] Беляков В.В., Бушуева М.Е., Сагунов В.И. Многокритериальная оптимизация в задачах оценки подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем. –Н.Новгород: НГТУ, 2001, 271 с.
- [3] Бушуева М.Е., Беляков В.В. Диагностика сложных технических систем. Разработка радиационно-стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа //В кн.: Труды 1-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799. Полупроводники. Апрель 2001 г. /Ред. А.В.Якимов. –Н.Новгород: ТАЛАМ, 2001, с.63–98.
- [4] Бушуева М.Е., Беляков В.В. Многокритериальная оптимизация контролепригодности сложных систем. Разработка радиационно-стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа //В кн.: Труды 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Полупроводники. Апрель 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. –Н.Новгород: ТАЛАМ, 2002, с.74–84.
- [5] Баршдорф Д. Нейронные сети и нечеткая логика. Новые концепции для технической диагностики неисправностей //Приборы и системы управления. 1996. №2. С.48–51.

Multi-criteria optimization of complex technical systems check-ability under fuzzy conditions of the technical object

M.E.Bushueva¹, V.V.Belyakov²

*Nizhni Novgorod State Technical University
Minin Street 24, Nizhni Novgorod 603600, Russia*

In this work the theoretical aspects of multi-criteria designing of the diagnostic systems of technical objects and their structured connections under incorrect external influence and fuzzy condition are considered. In connection with that increasing quality of operation and determination of real technical conditions of products (objects, systems) is a great problem; from it's correct decision depends the effect of their use. In provision required level quality operation and reliability of the complex technical systems special role belongs to the methods of technical diagnosing. In diagnostics of the technical systems quite often the defects appear under which signs and reasons of the faults bring fuzzy process of diagnostic.

To solve such problems of diagnostics the alternative methods of searching for defects were designed in practice. These methods are founded on the base of the mathe-

¹ Tel.: +7 8312 368344, E-mail: bushueva@nntu.nnov.ru

² Tel.: +7 8312 365672, E-mail: maximov@nntu.nnov.ru

mathematical system of the fuzzy sets and logician allowing realize the methods of the operating software-algorithmic instrument of searching for defects.

This work is a logical continuation of the researches presented by the authors in papers [2–4]. The above given methods and algorithms are an universal application and may be successfully used in any area of science and technology where reliable diagnostics and control of technical objects, systems or products under incorrect external influence are required.

1. Introduction

In diagnostics of the technical systems under incorrect external influence quite often the defects appear under which connection between signs and reasons of the faults is different. Simple two-digit statements like “correct-1”- “faulty-0” are not enough because modern diagnostic systems must recognize the dangerous conditions of the operating, reasons and types appeared faults, which are not clear.

Professor D.Barschdorff writes in his work [5], that an important step in all methods of diagnostic failure is building of a mathematical model giving identical information about operating system. Diagnosing faults of the system with the help of methods of recognition defects is effective at presence of the mathematical model of its functioning or process. These models can be solved using numerical methods, which put restrictions of technical system. Nearly all-real processes of the operating of the technical systems have a nonlinear behavior and it's typical of appearing faulty situations. These situations associate with carelessness of diagnostic information. In these cases experts are used; in other words human intervention is used in the process of diagnostic and controlling of the technical system. Using methods of fuzzy logic allowing to treat knowledge and make a conclusion on the basis of spreading and imperfect knowledge is possible to expel a man from controlling process and searching defects in such cases. The present work contains theoretical aspects of multi-criteria projecting of technical diagnosing systems and their structural interactions. This work is the logical continuation and development of the material given in [4].

NATO's program Science for Peace “*Design of radiation-hard semiconductor devices for communication systems and precision measurements using noise analysis*” is directed to improve the reliability of complex technical semiconductor systems functioning in radiation hard conditions. Thus, the problem of complex technical systems check-ability under fuzzy conditions of the technical object is very actual. Considered functioning methods and algorithm of complex technical system especially under multiple defects and ill-defined information in object are the part of the general problem of complex technical systems check-ability.

2. Fuzzy Sets

The Fuzzy-sets device is used for solving problems, which have unreliable and poorly formalized initial data in. The work «Fuzzy sets», by L.Zadeh published in 1965, represented a powerful incitement to the elaboration of a new mathematical theory. In this work L.Zadeh extended the classical notion of a «set», assumed, that characteristic function (the function of a quantity-accessory) can take any value in the interval (0,1), rather

than only 0 or 1. Such sets were called «fuzzy». In 1993 V.Kozko proved «The Fuzzy Approximation Theorem», *according to which any mathematical system may be approximated by the system founded on fuzzy logic*. According to [1], there are some strong sides of using the mathematical approach, based on fuzzy sets and fuzzy logics, such as: the description of terms and methods of solving problems in the close to natural language; universality and effectiveness. And at the same time there are typical drawbacks: the outcome initial kit of postulated fuzzy rules is formed by an expert and may turn out to be incomplete or inconsistent; the view and parameters of the accessory function, describing input and output variable systems, are selected subjective and may turn out to reflect reality not enough adequate.

The basic notion and features of fuzzy sets, transactions above fuzzy sets, as well as notion of the fuzzy graph are explained in work [1].

3. Task setting

We'll use "The fuzzy sets theory" to solve the problem of the technical system diagnosing.

Let the diagnosing object be in the manner of the fuzzy ordered graph. $\tilde{G}(V, U)$ with n vertexes, where V and U – the sets of *vertexes* and *edges*. The vertexes of the graph $\tilde{G}(V, U)$ are put in the correspondence with the pulleys of the diagnosing object, and the edges – with the communications between the vertexes. Moreover, the communications between the pulleys possess the certain stability level (degree of accessory) $\mu_{\tilde{G}}(v_i, v_j)$ ($\mu_{\tilde{G}}(v_i, v_j) \in [0, 1], v_i \in V, v_j \in V$). The set $Y(|Y| = y)$, stipulated by the purpose and the construction execution of the diagnosing object, is known. The subset $P(P \subset V, |P| = n - y)$ stands out the set $V(|V| = n)$. Each point $p_k \in P$ is in keeping with the realization cost $c(p_k)$ ($k = 1, n - y$). The number z of additional ordered checkpoints is given herewith. It is needed to supplement the check-points set Y with the set $Z^*(Z^* \subset P, |Z^*| = z)$ so, that the coefficient of the quest for the defect-depth of any ratio on the set $Y \cup Z^*$ strokes to the maximum, and the realization cost of the fixed points was minimum.

In this case the mathematical task setting has the form (1), where $C(Z) = \sum_{k \in Z} c(p_k)$ is the realization cost value of the checkpoints set Z of the diagnosing object.

4. Solution

The solution for the diagnosing object, given as the ordered (positive) graph $G(V, U)$ was considered in detail in [3]. The distinctive particularity of this solution, using the fuzzy ordered graph $\tilde{G}(V, U)$, in finding of the coefficient of the quest for the defect-depth of any ratio the particular checkpoints set.

The calculation of the coefficient of the quest for the defect-depth of any ratio using fuzzy sets is performed on the following formula (3):

$S_n = 2^n - 1$, the total number of the possible ratio defects from 1 to n ,

$F_n(Y)$ – the number of the uniquely distinguished defects of any ratio on the checkpoints set Y .

For the determination $F_n(Y)$ we'll use the following algorithm:

1. Plot the matrix **D** of reachability under the graph $\tilde{G}(V, U)$, proceeding from the rules of plotting the forward part of the fuzzy finite graph [1].

2. Plot the parity-check matrix $\tilde{\mathbf{B}}_Y$, which quantities represent the fuzzy set.

To find the set, defining the row vector of parity-check matrix $b(i, j)$ ($i < j$), if is necessary to take the fuzzy set, defined by the row under the number i , and the fuzzy set, defined by the column under the number j , from the matrix of reach ability, and then find their intersection [1]. There by all the row-vectors of the parity-check matrix $\tilde{\mathbf{B}}_Y$ are plotted.

3. Define the matrix $\mathbf{B}'_Y$, which will have ordinary (positive) set, consisting of 0 and 1 and being α -the level of the fuzzy set of the matrix $\tilde{\mathbf{B}}_Y$ (α – stability level of the communication was defined beforehand).

4. Delete columns, consisting of 0 only, from the matrix $\mathbf{B}'_Y$, and get the matrix $\mathbf{B}_Y$.

5. Select the columns, defining the particular defect, in the matrix $\mathbf{B}_Y$.

6. Delete the rows, which don't have units in chosen columns, and then delete the columns, those units in these rows, from the matrix $\mathbf{B}_Y$.

7. If all the columns, except the defined particular defect ones, are deleted from the matrix $\mathbf{B}_Y$, under investigation defect is called *uniquely recognized*, otherwise the under investigation defect is not uniquely recognized.

8. Examine all supposed defects in consequence in such way (items 5–7). The amount of the uniquely recognized defects will be defined by $F_n(Y)$.

Using the algorithm, presented above, and the formula (7), we can define K_{rm} on any checkpoint set and use it in solving the problem.

5. Example

To illustrate the developed method, the example with use of the fuzzy graph is presented. It's an example of multi-criteria optimization of complex technical systems checkability, the object, which model is presented in the form of the fuzzy ordered graph $\tilde{G}(V, U)$ showed in the figure (see page 108), is considered. The initial data is given in the example: the structure of the fuzzy graph $\tilde{G} = \{((1,4)|1), ((2,4)|1), ((2,5)|0,3), ((3,6)|0,7), ((4,6)|0,5), ((5,6)|1)\}$, the initial checkpoints set $Y=\{6\}$, the number $z=2$ of checkpoints organized in addition, the realization cost $C_1=5$ units, $C_2=7$ units, $C_3=6$ units, $C_4=8$ units, $C_5=4$ units of the points, preferring on additional checkpoints. The

task is determined under the minimum stability level of the communication (α -level) $\alpha=0,5$.

As a result, provided in the work, of optimized solution for satisfying the conditions of the task there must be the following check-points sets, $Y \cup Z = \{1, 2, 6\}$. And the coefficient of the quest for the defect-depth $K_{\text{тн}}(Y \cup Z) = 0,14$, by the realization cost of the additional checkpoints $C_{\text{реал}}(Z) = 12$ units.

6. Conclusion

From the comparison of the solutions of finding of the coefficient of the guest of the defect-depth of any ratio and the cost of the additional check-points introduction for the positive task [2–3] and fuzzy task, considered in this work, is clear, that the solution depends on the selection of the communication stability level α . This level depends on the incorrectness value of the external action to the system. In the small external action to the technical system $\alpha \rightarrow 0$ and the task becomes more positive. With the incorrect external action increase $\alpha \rightarrow 1$, the positive task decreases. To identify defects if is necessary to increase the number of checkpoints. In this connection, the cost of diagnostic systems vastly increases. In the considered task the coefficient of the guest-depth is not high, that leaves the possibility for the event, when defects are not identified.

The above given methods and algorithms are universal application and may be successfully used in all branches of science and technology that need the reliable diagnostics and operational check-up.

This work was partially supported by NATO's Scientific Affairs Division in the framework of the "Science for Peace" programme (Project SfP – 973799 Semiconductors).

References

- [1] Kofman A. Introduction to theory of fuzzy sets. –M.: Radio and communication 1982. P.431
- [2] Belyakov V.V., Bushueva M.E., Sagunov V.I. Multi-criteria optimization in the task assessment of mobility, competitiveness of motor and tractor engineering and complex technical systems diagnosing. –N.Novgorod: NSTU, 2001. 271 p.
- [3] Bushueva M.E., Belyakov V.V. Complex technical systems diagnosing /Design of radiation-hard semiconductor devices for communication systems and precision measurements using noise analysis //Proceedings of the NATO project SfP-973799 Semiconductors 1st workshop. April 2001 N.Novgorod: TALAM, 2001, p.63–98.
- [4] Bushueva M.E., Belyakov V.V. Multi-criteria optimization of complex technical systems check-ability //Proceedings of the NATO Project SfP-973799 Semiconductors 2nd workshop. April 2002. –N.Novgorod, TALAM, 2002, p.74–84.
- [5] Barshdorf D. Neuron systems and fuzzy logic. New ideas for technical faults diagnosing //Fittings and control systems. 1996. №2. P.48–51.