Д. т. н. Д. А. СЕЧЕНОВ, к. т. н. А. В. ПИСЬМЕНОВ, к. т. н. М. Д. СКУБИЛИН

Россия, г. Таганрог, Гос. радиотехнический ун-т

Дата поступления в редакцию 13.04 1999 г. — 22.07 1999 г.
Оппоненты *д. г.-м. н. В. М. ЮБКО, к. т. н. Т. Д. БОРДЯ*

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

Нечеткая многокритериальная исходная информация о совокупности альтернативных гипотез преобразуется в количественные экспертные оценки значимости каждой гипотезы с максимумом разрешающей способности.

Значительный прогресс индуктивной теории интерпретации информации связан с применением к ее задачам методов теории вероятностей, по которой причина (A) и ее следствие (B) рассматриваются как два постоянно сопутствующих друг другу признака. Еще Ф. Бэконом (XVII в.) был предложен принцип исключений, в символах теории множеств выражаемый как пересечение положительных инстанций I_i (i=1, 2, ..., k) минус объединение отрицательных инстанций I_i (i=k+1, ..., m) —

$$\bigcap_{i+1}^{k} I_i \; / \; \bigcup_{i=k+1}^{m} I_i \,. \tag{1}$$

Однако здесь каждая из i (i=1, ..., m) инстанций I_i принимает единственное из [0, 1] значение, что при анализе совокупности j (j=1, ..., n) альтернативных гипотез H_j ведет к низкой разрешающей способности принципа, т. к. для их нормированной корреляционной матрицы

$$R=\|r_{ij}\|^{n}_{i,j} \tag{2}$$

справедливо неравенство вида

$$-1\le r_{ij}\le +1, \tag{3}$$

а следовательно, имеет место нечеткое отношение R на множестве гипотез H.

Используя семейство обычных отношений, которому однозначно соответствует семейство вложенных разбиений множества H

$$H_1\subset H_{a+k}\subset\ldots\subset H_a\subset H_0, \tag{4}$$

где H_1 и H_0 — простые подмножества, гипотезы H допустимо представить кортежем в порядке возрастания их приоритета (экспертных оценок) —

$$H_1\Rightarrow H_{k-1}\Rightarrow\ldots\Rightarrow H_a\Rightarrow H_0 \tag{5}$$

или, при наличии неразличимых гипотез, —

$$H_1\Rightarrow H_{q+1}\Rightarrow\ldots\Rightarrow H_{i-k}\equiv H_{m+i}\Rightarrow H_q,$$

где $\Rightarrow$ — вес (приоритет) возрастает и $\equiv$ — вес (приоритет) неразличим.

В стремлении к максимальной достоверности результатов интерпретации исследуемого материала при параллельном повышении ее разрешающей способности можно воспользоваться алгоритмом перебора, состоящим из двух частей.

1. С помощью алгоритма Яблонского — Мак-Класки находятся все инстанции I, входящие в полный интерпретирующий тест T, и строится достаточно простой интерпретирующий тест T_1, число инстанций I_i в котором незначительно отличается от минимального или равно ему. Здесь уместно воспользоваться сокращением числа инстанций, веса́ p_i которых значительно меньше $p_{i\max}$, т. е. исключить все инстанции I_i с $p_i \ll p_{i\,\max}$.

2. Построенный интерпретирующий тест проверяется на минимальность, и при отрицательном результате проверки производится поиск оптимального теста $T_о$. Под оптимальным понимается тест $T_о=T_1\cup T$, содержащий минимальное число инстанций и обладающий достоверностью не хуже допустимой.

Предположив для простоты, что исходная булева матрица является циклической ($\boldsymbol{M}\equiv\boldsymbol{M}_о$), тест T_1 в этом случае есть пустое множество, и $T\equiv T_2$. Здесь T_2 — тест допустимой степени доверия.

Далее с помощью матрицы $\boldsymbol{M}_о$ строится интерпретирующий тест, допустимый в смысле минимизации объема. Полагая, что матрица $\boldsymbol{M}_о$ содержит n строк и m столбцов, и обозначив через $E_m=\{a_i\}$ множество всех двоичных наборов $a_i=(\sigma_1{}^i, \sigma_2{}^i, \ldots, \sigma_m{}^i)$, $i=0{,}2^m-1$, а через $E_о$ — множество, элементами которого являются строки матрицы $\boldsymbol{M}_о$, получим, что $E_о\subseteq E_m$, где $E_о$ содержит n элементов. Затем определяется множество покрытых наборов E_2 для всех $a_r\in E_m$:

а) если $a_r\in E_о$, то $a_r\in E_2$;

б) если $a_r\in E_о$ и в E_2 имеется такой набор a_i, в котором $a_i\cong a_r$ (сравнимы), то $a_r\in E_2$.

Теперь $E_о\subseteq E_2\subseteq\ldots\subseteq E_m$, и $E_1=E_m/E_2$ — множество непокрытых наборов.

Т е о р е м а. Если $a\in \boldsymbol{E_1}$, то $\overline{a}$ определяет интерпретирующий тест T.

При рассмотрении множества E_2 допустимо считать, что каждый набор $a_i\in E_2$ определяет множество проверок $\Pi_i\subseteq\Pi$. Из проверок, входящих в Π_i, строится элементарная дизъюнкция $q_i=\pi_1^i\vee\pi_2^i\vee\ldots\vee\pi_n^i$. Это построение выполняется для всех множеств, определяемых наборами из E_2. Из полученного множества элементарных дизъюнкций строится конъюнктивная нормальная форма некоторой монотонной функции алгебры логики $f(\pi_1, \ldots, \pi_m)$.

При подмножестве наборов $\overline{E} \subseteq E_m$ таком, что если $a \in E$ ($E \subseteq E_m$), то $\overline{a} \in \overline{E}$, и с учетом правил построения совершенных конъюнктивных нормальных форм функций алгебры логики, заданных в табличной форме, оказывается, что $f_1(\pi_1, \ldots, \pi_m)=0$ на наборах, входящих в $\overline{E}_2$. Но инстанции, входящие в одну элементарную конъюнкцию из дизъюнктивной нормальной формы функции $f(\pi_1, \ldots, \pi_m)$, образуют интерпретирующий тест относительно S, R, Γ. (Здесь S — множество возможных попарно различимых состояний объекта $S=\{s_i\}$, $i=\overline{1,n}$; R — элементы булева пространства аргументов данной функции, на которых функция принимает значение “1”; Γ — множество возможных троек $\{s_i, \pi_j, a_{ij}\}$.

Пусть $E'=E_m / \overline{E}_2$ — множество таких наборов, на которых $f(\pi_1, \ldots, \pi_m)=1$. Из свойства монотонных функций алгебры логики следует, что если $a \in E'$, то a_r определяет некоторое подмножество проверок, конъюнкция которых входит в дизъюнктивную нормальную форму функции $f(\pi_1, \ldots, \pi_m)$. Следовательно, каждый набор из E' определяет интерпретирующий тест относительно Γ, S, R.

Л е м м а . $E_m \setminus \overline{E}_2=E_m \setminus E_2$.

1) Пусть $a \in E_m \setminus \overline{E}_2 \Rightarrow a \in E_m$ и $a \notin \overline{E}_2 \Rightarrow \overline{a} \in E_m$ и $\overline{a} \in \overline{E}_2 \Rightarrow \overline{a} \in E_m$ и $\overline{a} \notin E_2 \Rightarrow \overline{a} \in E_m \setminus E_2 \Rightarrow a \in E_m \setminus E_2$.

2) Пусть $a \in E_m \setminus E_2 \Rightarrow \overline{a} \in E_m \setminus E_2 \Rightarrow \overline{a} \in E_m$ и $\overline{a} \notin E_2 \Rightarrow a \in E_m$ и $a \notin \overline{E}_2 \Rightarrow a \in E_m \setminus \overline{E}_2$.

Из 1) и 2) следует, что $E_m \setminus \overline{E}_2=E_m \setminus E_2$. Лемма доказана.

Так как $E_m \setminus \overline{E}_2=E'$ и $E_m \setminus E_2=E_1$, то из леммы вытекает: $E'=\overline{E}_1$.

Теорема утверждает, что если $a \in E_1$, то $\overline{a}$ определяет интерпретирующий тест T. С другой стороны, по определению, если $a \in E_1$, то $\overline{a} \in \overline{E}_1$, т. е. $\overline{a} \in E'$. Но, как ранее показано, каждый набор из E' определяет интерпретирующий тест. Таким образом, теорема доказана.

С л е д с т в и е . Пусть $\overline{a}$ определяет оптимальный интерпретирующий тест T_0 и число наборов $\|\overline{a}\|=p$ по параметру L. Тогда все наборы $a_i \in E_m$ такие, что $\|a_i\| \geq m-p+1$ являются покрытыми, т. е. принадлежат множеству E_2. Отсюда вытекает предлагаемый *метод построения оптимального интерпретирующего теста*.

Изначально с помощью матрицы $\boldsymbol{M}_0$ строится достаточно простой интерпретирующий тест T_2, а затем синтезируется набор $a \in E_m$, такой, что $\overline{a}$ определяет тест T_2. Пусть $\|\overline{a}_i\|=p$. Из всех наборов $a_i \in E_m$, норма которых $\|a_i\|=m-p+1$, образуется подмножество $E_m^{m-p+1} \in E_m$. Затем проверяется, являются ли все наборы из E_m^{m-p+1} покрытыми ($E_m^{m-p+1} \subset E_2$) или нет. Если $E_m^{m-p+1} \subset E_2$, то тест T_2 является оптимальным. Если в E_m^{m-p+1} существует хотя бы один не покрытый набор $a_i \in E_1$, то $\overline{a}$ определяет достаточно простой интерпретирующий тест $T_3 \subset T_2$. Тест T_l заменяем на T_{l+1} (l = 2, 3, …) до тех пор, пока не достигается минимум L.

Процедура построения теста T_3 связана с перебором, состоящим в том, что для каждого $a_i \in E_m^{m-p+1}$ определяется принадлежность a_i множеству E_2. Длина этого перебора равна L_m^{p-1} (числу инстанций в подмножестве E_m^{m-p+1}).

Если подмножество $E_m^{m-p} \subset E_m$ состоит из всех элементов $a_r \in E_m$, таких, что $\|a_r\|=m-p$, можно сократить длину перебора. Для этого элементы в подмножествах E_m^{m-p} и E_m^{m-p+1} упорядочивают по возрастанию их десятичных эквивалентов. Затем строится прямоугольная таблица, имеющая L_m^p столбцов и L_m^{p-1} строк, в которой j-й столбец соответствует j-му элементу в упорядоченном подмножестве E_m^{m-p}, а i-я строка соответствует i-му элементу в упорядоченном подмножестве E_m^{m-p+1}.

При анализе каждого элемента из E_m^{m-p} в каждом столбце таблицы отмечаются те строки, которые соответствуют наборам из E_m^{m-p+1}, сравнимым с первым элементом E_m^{m-p}. Полученная таблица и есть матрица покрытий. Каждая строка матрицы покрытий содержит $m-p+1$ отметок, а каждый ее столбец — p отметок.

Число L_{i+j-2}^{i-1}, стоящее на пересечении i-й строки ($i=\overline{1,q}$) и j-го столбца ($j=\overline{1,r}$) таблицы, означает, что квадратная диагональная матрица, содержащая L_{i+j-2}^{i-1} строк, в которой отметки расположены только по главной диагонали, входят в матрицу покрытий, если $i \leq p$ и $j \leq m-p+1$.

Для построения матрицы покрытий при заданных m и n необходимо:

а) определить $r=m-p+1$;

б) построить ряд квадратных диагональных матриц в том порядке, в котором расположены числа в p-й строке таблицы, начиная с L_{r+p-2}^{p-1}, причем последние строки всех диагональных матриц должны находиться на одной горизонтали;

в) над диагональной матрицей, определяемой числом L_{i+p-2}^{p-1} ($i=\overline{1,r}$), строится таким же образом ряд диагональных матриц, причем построение производится начиная с диагональной матрицы, которая определяется числом, стоящим над L_{i+p-2}^{p-1}, в (p−1)-й строке соответствующего столбца. Такое построение производится для всех матриц, определяемых p-й строкой таблицы. Следующий ряд матриц, определяемый (p−2)-й строкой таблицы, строится аналогично.

Набору $a \in E_m^{m-p+1}$ соответствует j-й столбец матрицы покрытия. Из построения матрицы покрытий следует, что если $a_i \in E_2$ (набор a является покрытым), то все наборы из E_m^{m-p}, которым соответствуют строки, имеющие отметки в j-м столбце, являются покрытыми.

Обозначим через $\tilde{E}$ такое подмножество множества E_m^{m-p}, что если все наборы из $\tilde{E}$ входят в E_2 ($\tilde{E}\subset E_2$), то все наборы из E_m^{m-p+1} тоже входят в E_2 ($E_m^{m-p+1}\subset E_2$). Обозначим через $\mu(p)$ число наборов в множестве $\tilde{E}$. Из рассмотрения структуры матрицы покрытий следует оценка:

$$(1/p)L_m^{p-1}\leq\mu(p)<((m-(p-1))/m)L_m^{p-1}, \qquad (6)$$

где L_m^{p-1} — число наборов в E_m^{m-p+1}.

Если вместо элементов из E_m^{m-p+1} проверять на покрытие элементы из $\tilde{E}$, то, согласно приведенной оценке, перебор сокращается.

В целях сокращения перебора при нахождении хотя бы одного оптимального по достоверности и объему теста желательно найти алгоритм, обеспечивающий $\tilde{E}$ минимум μ ($\mu_{\min}$), а для получения достаточного, но не минимального, числа переборов $\mu(p)$ можно ограничиться нормой ($m-p$).

Интерпретирующий вес p_i (ценность) реализации (признака, инстанции) вносит существенный вклад в результаты интерпретации исходного материала. Его значение определяется из

$$p_i=\log_2 P(D_i/k_{is})/P(D_i), \qquad (7)$$

где $P(D_i/k_{is})$ — вероятность интерпретации D_i при условии, что признак k_i получил значение k_{is};
$P(_{Di})$ — априорная вероятность интерпретации.

Но k_{is} могут быть одно- и многоразрядными, причем т. к. m-разрядный признак имеет ряд возможных состояний $k_{i1}, k_{i2}, \ldots, k_{im}$, то чем выше разрядность признака, тем выше достоверность результатов интерпретации.

Если априорные вероятности состояний $P(D_j)$ могут быть получены из статистических данных, то энтропия интерпретируемой системы определяется из

$$H(D)=-\Sigma(D_j)\log_2 P(D_j). \qquad (8)$$

При использовании полного интерпретирующего комплекса признаков K состояние системы однозначно оценивается в $P(D)=0$, $P(D_j)=0$ ($j=2, \ldots, n$). При этом энтропия системы $H(D/K)=0$, а интерпретирующая ценность результата определяется по

$$I_D(K)=p_j(K)=H(D)-H(D/K)=H(D). \qquad (9)$$

В реальных условиях выражение (8) выполнимо далеко не всегда, тогда $H(D/K)\neq 0$, и для достижения заданного значения вероятности $P(D_1)=P_{\text{доп}}(D_i)$ требуется информация о ценности комплекса признаков K:

$$p(K)=\xi H(D), \qquad (10)$$

где ξ — коэффициент полноты комплекса признаков, $0<\xi<1$. Значение ξ зависит от надежности интерпретации, и чем ближе значение ξ к единице, тем выше значение $P(D_1)$.

Если априорные вероятности интерпретируемого материала неизвестны, то можно воспользоваться верхней оценкой энтропии системы —

$$H(D)\leq \log_2 n, \qquad (11)$$

где n — число состояний системы.

Условие оптимальности комплекса признаков K_j для результата интерпретации D_i определяется из

$$\lambda_{ij}=p_i(k_j)/C_{ij}, \qquad (12)$$

где $p_i(k_j)$ — интерпретирующая ценность по признаку k_j;
C_{ij} — коэффициент сложности получения информации по признаку k_j для D_i, характеризующий его трудоемкость, достоверность и др. факторы.

Коэффициент оптимальности обследования для всех $j=\overline{1,n}$ определяется по

$$\lambda_j=\sum_{i=1}^{n}P(D_i)p_i(k_j)/\sum_{i=1}^{n}P(D_i)C_{ij}=p_i(k_j)/C_j. \qquad (13)$$

При вычислении λ_j проводится осреднение информации по всем результатам интерпретации.

Коэффициент оптимальности при двух признаках k_1 и k_2 определяется из

$$\lambda=[p_i(k_j)+p(k_2/k_1)]/[C_1+C_2], \qquad (14)$$

т. к. коэффициенты оптимальности признаков k_1 и k_2

$$\lambda_1=p_j(k_1)/C_1 \text{ и } \lambda_2=p_j(k_2/k_{1s})/C_2,$$

а для комплекса признаков $k_1, k_2, \ldots, k_n$

$$(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n)_{\min}\leq X\leq(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n)_{\max}. \qquad (15)$$

Таким образом, комплекс признаков K из ν обеспечивает коэффициент оптимальности

$$\lambda=p_j(K^{(\nu)})/\sum_{j=1}^{\nu}C_j, \qquad (16)$$

где $p_i(K^{(\nu)})$ — интерпретирующая ценность комплекса признаков, а при $C_1=C_2=\ldots=C_\nu=C_0$

$$\lambda=p_i(K^{(\nu)})/(\nu C_0). \qquad (17)$$

Условие максимума (12) остается в силе для $K_j<K$.

В реальных же условиях численные значения признаков остаются труднодоступными, хотя получить качественные их оценки представляется возможным. Тогда присвоив каждой гипотезе H_j по каждой инстанции I_i($i=1, \ldots, m$) ранг ($a_{ij}=[1, \ldots, n]$) при положительных инстанциях и ранг $a_{ij}=0$ — при отрицательных, определяют рейтинги (экспертные оценки) R_j каждой из них по

$$R_j=\sum_{j=0}^{n}(n+1-a_{ij})p_i, \qquad (18)$$

где p_i — вес инстанции.

При достижении коэффициента конкордации W значения $W\geq 0{,}5$, определяемого по

$$W=12(R_j-n^{-1}\sum_{i=1}^{n}R_j)^2/[m^2(n^3-n)+m\sum_{i,j=1}^{n}(k_q^{\,3}-k_q)]^{-}, \qquad (19)$$

где k_q — q-е число одинаковых рангов в i-м ранжировании, результаты признаются приемлемыми, причем здесь гипотезы H упорядочиваются по R_j, а разрешающая способность и достоверность ранжирования гипотез достигают максимума. Значения R_j гипотез H_j обеспечивают привлекательность и однозначность экспертных оценок.

Предложенная методика приемлема для нужд технической и медицинской диагностики, для распознавания изображений, при проектировании систем защиты информации, а также для поиска оптимумов в социологии, при оценке перспективности геологических структур на наличие полезных ископаемых и т. д.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Об одном методе решения задачи классификации объектов или явлений // Техн. кибернетика.— 1965.— № 1.— С. 58—64.

2. Журавлев Ю. И., Никифоров В. В. Алгоритмы распознавания, основанные на вычислении оценок // Кибернетика.— 1971.— № 3.— С. 1—11 .

3. Вапник В. Н., Червонинкас А. Я. Теория распознавания объектов.— М. : Наука, 1974.

4. А. с. 1688260 СССР. Устройство для анализа альтернативных решений / М. Д. Скубилин, А. В. Письменов.— Опубл. в Б. И., 1991, № 40.

5. Пат. 2018951 РФ. Устройство для анализа альтернативных решений / М. Д. Скубилин, О. М. Фабрикант, Г. Н. Шаповалов.— Опубл. в Б. И., 1994, № 16.

К. т. н. Н. М. ВАКИВ, Ю. МАЦЯК,
к. х. н. О. Я. МРУЗ, д-р инж. Ю. ПОГОЖЕЛЬСКА,
д. ф.-м. н. О. И. ШПОТЮК

Украина, г. Львов, Науч.-производств. предприятие «Карат»
Польша, г. Варшава, Варшавская Политехника

Дата поступления в редакцию
04.01 2000 г.
Оппонент *д. ф.-м. н. А. О. МАТКОВСКИЙ*

ДЕГРАДАЦИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК

Исследовано изменение сопротивления терморезисторов с отрицательным ТКС под действием экстремальных значений импульсов тока.

Керамические терморезисторы (ТР) с отрицательным ТКС широко используются в современной электронной аппаратуре для защиты источников вторичного электропитания от пусковых токов, для температурной компенсации, измерения температуры и др. По сравнению с известными схемными решениями указанных задач применение ТР позволяет получить преимущества в цене, в габаритных размерах, в надежности конструкции. Промышленные образцы ТР изготовляют в основном из сложных многокомпонентных полупроводниковых материалов на основе оксидов переходных металлов [1].

В то же время известно, что для большинства керамических ТР характерно протекание деградационных процессов, проявляющееся, в основном, в возрастании номинального сопротивления в процессе эксплуатации. Так, в работах [2, 3] показано, что в ТР на основе керамики со структурой шпинели в системе оксидов Ni и Mn металлизация керамики (формирование контактных площадок) при 850°С с последующим быстрым охлаждением приводит к изменению катионного распределения и ближнего порядка в структуре шпинели, что и является основным фактором, вызывающим со временем деградацию параметров ТР.

Однако при использовании ТР в качестве ограничителей пусковых токов деградационные процессы определяются еще и специфическим воздействием *токовых импульсов*, сопровождающимся локальными перегревами тела ТР и электрическими эффектами.

Целью настоящей работы было изучение процессов, происходящих на границе керамики и контактной площадки, и изменений микроструктуры самой керамики, а также установление их связи с изменением электрического сопротивления ТР в зависимости от количества воздействующих импульсов тока.

В работе использован метод деградации ТР в режимах экстремальных токовых нагрузок [4]. В таких условиях изменения параметров материала инициируются как воздействием электрических полей, так и влиянием повышенных температур вследствие токового разогрева, что дало возможность определить наиболее уязвимые области тела ТР при воздействии токовых импульсов.

Экспериментальные образцы ТР изготовлены с использованием солевого метода традиционной керамической технологии из углекислых солей марганца, кобальта, никеля и меди [5—7]. Образцы представляли собой таблетки из керамического материала диаметром 10 и толщиной 1 мм с нанесенными контактными площадками из серебра и припаянными медными выводами. Для защиты от влияния внешних воздействий элементы покрывали электроизоляционной негорючей эмалью на основе кремнийорганического лака. Номинальное сопротивление ТР при 25°С составляло 16 Ом (допустимое отклонение в пределах одной партии −20÷+40%).

Испытания ТР на циклическое воздействие токовой нагрузки проводились на специально собранной установке путем многократной зарядки конденсаторов емкостью 270 мкФ переменным током (при входном напряжении 250 В с частотой 50 Гц) через ТР и выпрямительный мост. Максимальное значение тока, проходящего через ТР в момент включения, равно ~22 А. Величина этого тока существенно зависит от температуры окружающей среды. В нашем случае испытания проводились при 25°С. Параметры выбранного режима испытаний значительно