УДК 004.93'1

**Т.Б. МАРТЫНЮК, А.В. КОЖЕМЯКО, Л.М. КУПЕРШТЕЙН**

# ФОРМАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ

**Аннотация.** Рассмотрен алгоритм классификации объектов по критерию максимума дискриминантных функций, особенностью которого является параллельная обработка по столбцам матрицы, составленной из элементов дискриминантных функций. Приведено представление данного алгоритма в терминах системы алгоритмических алгебр В.М. Глушкова.

**Ключевые слова:** классификация объектов, система алгоритмических алгебр В.М. Глушкова, обработка по разностным срезам, дискриминантная функция.

## ВВЕДЕНИЕ

В ряде фундаментальных работ достаточно подробно описаны не только базовые положения систем алгоритмических алгебр (САА) В.М. Глушкова [1–5], но и теоретические основы формирования их разновидностей и клонов [6–11]. Кроме того, в последних публикациях предложены варианты использования базиса САА В.М. Глушкова для представления конкретных алгоритмов обработки информации. Эти публикации продолжают цикл работ, связанных с сортировкой массивов данных [10, 12–15], и с другими видами мультиобработки, например с мультиобработкой векторных массивов данных по разностным срезам (РС) [16]. При этом в [17] в базисе модифицированной САА В.М. Глушкова представлены варианты многооперандного суммирования (свертки) элементов векторного массива по РС, а также в качестве расширения такой обработки — варианты пороговой обработки векторного массива по РС для реализации модели порогового нейрона [18, 19].

В настоящей статье на базе РС предложен алгоритм классификации объектов, предполагающий параллельную обработку элементов матрицы взвешенных компонентов входного вектора признаков, что расширяет функциональные возможности процесса классификации за счет формирования одновременно с вектором классификации вектора рангов дискриминантных функций [20]. Представлен усовершенствованный алгоритм классификации объектов в терминах САА В.М. Глушкова.

Целью работы является раскрытие функциональных возможностей компактного описания в терминах САА В.М. Глушкова алгоритма классификации объектов на базе РС.

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПО РС ЭЛЕМЕНТОВ ДИСКРИМИНАНТНЫХ ФУНКЦИЙ

Дискриминантные функции (ДФ) представляют собой разделяющие функции между областями (конфигурациями) классов в пространстве признаков объектов (образов) при их классификации [21]. По признаку максимума одной из $m$ ДФ, где $m$ — количество классов, определяется принадлежность распознаваемого образа, представленного входным вектором признаков, к конкретному классу [22].

Таким образом, если сформированы $m$ ДФ вида

$$\begin{cases} g_1(X) = w_{11}x_1 + w_{12}x_2 + \ldots + w_{1n}x_n, \\ g_m(X) = w_{m1}x_1 + w_{m2}x_2 + \ldots + w_{mn}x_n, \end{cases} \quad (1)$$

т.е.

$$g_i(X) = \sum_{j=1}^{n} w_{ij} x_j, \tag{2}$$

где $x_j$ — $j$-я компонента входного вектора $X$ признаков образа, $w_{ij}$ — вес вхождения $j$-й компоненты в $i$-й класс $C_i$, $i = \overline{1, m}$, то решающее правило классификации по критерию максимума ДФ имеет вид [22, 23]

$$X \in C_k, \text{ если } g_k(X) = \max_i g_i(X), \ k = \overline{1, m}.$$

В работе [20] предложено не формировать все $m$ ДФ вида (1) с последующим определением максимальной среди них, а сформировать матрицу $\mathbf{A}^\circ$ из элементов (слагаемых) $m$ ДФ (1) с дальнейшей их обработкой параллельно по столбцам, поскольку они состоят из одноименных элементов-слагаемых ДФ (1). Такая параллельная обработка по столбцам матрицы $\mathbf{A}^\circ$ правомочна, поскольку любой сумме вида (2) присущи свойства коммутативности и ассоциативности [24]. Таким образом, определить максимальную из $m$ сумм вида (1) можно в процессе одновременного их уменьшения на величину общей составляющей, которую формируют минимальные элементы в каждом столбце обрабатываемой в данный момент матрицы $\mathbf{A}^t$ в $t$-м цикле обработки, где $t = \overline{1, N}$. При этом в процессе последовательного обнуления соответствующих строк исходной матрицы $\mathbf{A}^\circ$ можно определить ранги ДФ, начиная с первой до $m$-й.

В результате алгоритм классификации объектов по такому принципу обработки элементов ДФ представляется следующим образом. Исходными данными являются: вектор входных сигналов $X = \{x_j\}$; матрица весов $W = \{w_{ij}\}$; вектор классификации $P = \{p_i\}$; классы $C = \{C_i\}$, где $j$ — размерность вектора $X$ $\{j = \overline{1, N}\}$, $i$ — количество классов $C$ $\{i = \overline{1, m}\}$.

**Шаг 1.** Формирование матрицы $\mathbf{A}^\circ$ взвешенных входных сигналов $x_j$ вида

$$\mathbf{A}^\circ = \begin{vmatrix} a_{11}^\circ & a_{12}^\circ & \dots & a_{1n}^\circ \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1}^\circ & a_{m2}^\circ & \dots & a_{mn}^\circ \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1^\circ \\ \dots \\ A_m^\circ \end{vmatrix}, \tag{3}$$

причем эти входные сигналы как элементы $a_{ij}^\circ$ матрицы $\mathbf{A}^\circ$ вычисляются $a_{ij}^\circ = w_{ij} \cdot x_j$; присвоение единичного значения всем элементам $p_i$ вектора классификации $P$, т.е. $P = (11..1)^{\mathrm{T}}$.

**Шаг 2.** Выделение минимальных элементов $q_j^t$ одновременно во всех столбцах обрабатываемой в данный момент матрицы $\mathbf{A}^{t-1}$ вида

$$q_j^t = \min_i \{a_{ij}^{t-1}\}, \ t = \overline{1, N}, \tag{4}$$

где $N$ — количество циклов классификации.

**Шаг 3.** Вычисление разностных срезов $\overline{a}_j^t$ одновременно во всех столбцах обрабатываемой в данный момент матрицы $\mathbf{A}^{t-1}$ и формирование неупорядоченной матрицы $\overline{\mathbf{A}}^t$ следующим образом:

$$\overline{\mathbf{A}}^{\mathbf{t}} = \begin{vmatrix} \overline{a}_{11}^{t} & \overline{a}_{12}^{t} & \ldots & \overline{a}_{1n}^{t} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \overline{a}_{m1}^{t} & \overline{a}_{m2}^{t} & \ldots & \overline{a}_{mn}^{t} \end{vmatrix}, \tag{5}$$

причем

$$\overline{a}_{ij}^{t} = a_{ij}^{t-1} - q_{j}^{t}, \ \ j = \overline{1, N}; \tag{6}$$

проверка условия равенства нулю хотя бы одной из строк неупорядоченной матрицы $\overline{\mathbf{A}}^{t}$ вида

$$\exists \, \overline{A}_{k}^{t} = 0, \ \ k = \overline{1, m}, \tag{7}$$

а также условия равенства нулю всех строк неупорядоченной матрицы $\overline{\mathbf{A}}^{t}$ вида

$$\forall \, \overline{A}_{i}^{t} = 0, \ \ i = \overline{1, m}. \tag{8}$$

Если выполняется условие (7), то переходим к шагу 4, а если (8), — то к шагу 5.

**Шаг 4.** Продвижение с обменом (транспозиция) вправо к крайним столбцам нулевых элементов $\overline{a}_{ij}^{t}$ в каждой строке неупорядоченной матрицы $\overline{\mathbf{A}}^{t}$ (5) и формирование упорядоченной матрицы $\mathbf{A}^{t}$ следующим образом:

$$A_{i}^{t} = \overline{Tr_{2}}(\overline{A}_{i}^{t}), \ \ i = \overline{1, m}\,; \tag{9}$$

одновременное обнуление $k$-го элемента $p_{k}$ вектора $P$, соответствующего обнуленной строке $\overline{A}_{k}^{t}$ (7); маскирование всех нулевых элементов $a_{kj}^{t}$ $k$-й обнуленной строки упорядоченной матрицы $\mathbf{A}^{t}$ и переход к шагу 2.

**Шаг 5.** Сохранение единичного значения $l$-го элемента $p_{l}$ вектора $P$, соответствующего последней обнуленной строке $\overline{A}_{l}^{N}$ в $N$-м цикле; завершение процесса классификации.

Таким образом, единичное значение $l$-го элемента $p_{l}$ вектора $P$ означает, что входной объект, заданный вектором $X$ его признаков, принадлежит $l$-му классу $C_{l}$, т.е. $(X \,|\, p_{l} = 1, \ l = \overline{1, m}) \Rightarrow C_{l}$.

Цикл процесса классификации осуществляется шагами 2–4. В табл. 1 приведен пример реализации представленного алгоритма классификации, начиная с шага 2, применительно к исходной матрице $\mathbf{A}^{\circ}$ размера $3 \times 3$ вида

$$\mathbf{A}^{\circ} = \begin{vmatrix} 2 & 3 & 6 \\ 4 & 6 & 2 \\ 5 & 1 & 8 \end{vmatrix}.$$

На шаге 2, кроме обрабатываемой в данный момент матрицы $\mathbf{A}^{t-1}$, для $t$-го цикла указан вектор минимальных элементов $q_{j}^{t}$ для каждого ее столбца. Прочерками (см. табл. 1) обозначены нулевые элементы полностью обнуленной строки матрицы, которые в дальнейшем не обрабатываются. Единичное значение элемента $p_{3}$ вектора $P$ в данном случае соответствует максимальной ДФ $g_{3}(X)$.

**Таблица 1**

| Циклы | Шаг 2<br>Текущая матрица $\mathbf{A}^{t-1}$ | Шаг 3<br>Неупорядоченная матрица $\overline{\mathbf{A}}^t$ | Шаг 4<br>Упорядоченная матрица $\mathbf{A}^t$ | Вектор $P$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $\begin{vmatrix}2&3&6\\4&6&2\\2&1&2\end{vmatrix}$<br>$[2\ \ 1\ \ 2]$ | $\begin{vmatrix}0&2&4\\2&5&0\\3&0&6\end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix}2&4&0\\2&5&0\\3&6&0\end{vmatrix}$ | $\begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix}$ |
| 2 | $\begin{vmatrix}2&4&0\\2&5&0\\3&6&0\end{vmatrix}$<br>$[2\ \ 4\ \ 0]$ | $\begin{vmatrix}0&0&0\\0&1&0\\1&2&0\end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix}0&0&0\\1&0&0\\1&2&0\end{vmatrix}$ | $\begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix}$ |
| 3 | $\begin{vmatrix}-&-&-\\1&0&0\\1&2&0\end{vmatrix}$<br>$[1\ \ 0\ \ 0]$ | $\begin{vmatrix}-&-&-\\0&0&0\\0&2&0\end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix}-&-&-\\0&0&0\\2&0&0\end{vmatrix}$ | $\begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix}$ |
| 4 | $\begin{vmatrix}-&-&-\\-&-&-\\2&0&0\end{vmatrix}$<br>$[2\ \ 0\ \ 0]$ | $\begin{vmatrix}-&-&-\\-&-&-\\0&0&0\end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix}-&-&-\\-&-&-\\-&-&-\end{vmatrix}$ | $\begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix}$ |

## РАСШИРЕНИЕ БАЗИСА САА В.М ГЛУШКОВА

Параллельная обработка по строкам и столбцам матрицы $\mathbf{A}^t$ требует введения двух размеченных массивов. Рассмотрим их:

- размеченный массив элементов $(a_1, a_2 \ldots, a_n)$ в виде вектор-строки $M_r = \text{ПЛ}\,\rceil a_1 a_2 \ldots a_n^*$, где ПЛ, и * — специальные маркеры, обозначающие соответственно левую и правую границу этого массива, $\rceil$ — указатель; $n$ — размерность массива;
- размеченный массив элементов $(a_1, a_2 \ldots, a_m)$ в виде вектор-столбца $M_c = \text{ПЛ}\,\rceil a_1 a_2 \ldots a_m^*$.

В качестве базисных операторов приняты следующие [10, 12, 13]:

- УСТ($Z$) — оператор установки последовательности $Z$ указателей $V$ и маркеров $W$, где $Z \in (V \cup W)$;
- НРУ — оператор начальной расстановки указателей;
- ФИН — оператор завершения работы регулярной схемы;
- ВЫВ($R$) — оператор вывода результата;
- $\vec{C}$ — оператор сдвига указателя $\rceil$ на один элемент вправо;
- ТРАНСП($l,r$) — перестановка соседних элементов $l$ и $r$ массива $M_r$.

Кроме того, далее использованы такие логические операции [7, 10, 12, 13], как дизъюнкция $\alpha \vee \beta$, коньюнкция $\alpha \wedge \beta$, отрицание $\overline{\alpha}$, композиция $A \times B$ (т.е. последовательное выполнение операторов $A$ и $B$), альтернатива $[\alpha](A \vee B)$ (т.е. если $\alpha$, то $A$, иначе $B$) и цикл $[\alpha]\,\{A\}$ (т.е. если $\alpha$ ложное, то $A$, при $\alpha$ истинном — конец цикла), а также используются следующие базисные условия: $l \leq r$ истинное при выполнении указанного соотношения для соседних элементов $l$ и $r$ массива и $d(*)$ истинное при достижении указателя $\rceil$ маркера *.

Особенностью предложенной обработки элементов матрицы по РС является левосторонняя обработка элементов массивов $M_r$ и $M_c$ в результате циклического сдвига указателя $\rceil$ слева направо.

С учетом особенности параллельной обработки массивов данных по РС обоснованными являются следующие дополнения к базисным операторам и условиям:

- ВЫЧ$(M, q)$ — оператор параллельного вычитания из всех элементов массива $M$ элемента $q$;
- НУЛ$(\overline{a_1, a_n})$ — оператор обнуления одного из элементов массива $M$;
- $\gamma$ истинное при выполнении условия нахождения нулевых элементов в крайних правых позициях массива $M_r$;
- $\theta_k$ истинное при выполнении условия (7);
- $\theta$ истинное при выполнении условия (8).

**ЗАПИСЬ АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ В ТЕРМИНАХ САА В.М ГЛУШКОВА**

В качестве базовых операций предложенного алгоритма классификации используются следующие:

- выделение минимального элемента $q_j^t$ (4) в векторном массиве $A_j^{t-1}$, где $j = \overline{1, n}$;
- вычисление РС $\overline{A}_j^t$ с элементами $\overline{a}_{ij}^t$ (6);
- продвижение с обменом (транспозиция) вправо к крайним позициям нулевых элементов в векторном массиве $\overline{A}_i^t$ (9) , где $i = \overline{1, m}$.

Эти базовые операции можно записать в виде составных операторов следующим образом:

- составной оператор выделения минимального элемента среди элементов $(\overline{a_1, a_m})$ РС $A_j^{t-1}$, обозначенный как массив $M_{cj}$:

$$\text{МИН}_j(\overline{a_1, a_m})::= [d(*)]\{[l \le r](\text{УСТ}(\min = l) \vee \text{УСТ}(\min = r)\vec{\text{C}}) \times$$
$$\times [\min \le r](\text{УСТ}(\min = \min) \vee \text{УСТ}(\min = r)\vec{\text{C}}\}, \tag{10}$$

с помощью которого реализуется последовательное выделение минимального элемента в каждой паре $(\min, r)$ соседних элементов массива $(\overline{a_1, a_n})$, начиная с первой пары $(l, r)$, со сдвигом на один элемент вправо по массиву и с установкой (назначением) элементу min одного из двух значений;

- составной оператор вычисления РС $\overline{A}_j^t$, который также можно обозначить как массив $M_{cj}$:

$$\text{СРЕЗ}_j(\overline{a_1, a_m})::= \text{НРУ} \times \text{МИН}_j(\overline{a_1, a_m}) \times \text{ВЫЧ}_j(M, \min) \tag{11}$$

с учетом одного оператора последовательного действия МИН$_j(\overline{a_1, a_m})$ (10) и одного оператора параллельного действия ВЫЧ$_j(M, \min)$ в каждом массиве $M_{cj}$;

- составной оператор транспозиции нулевых элементов в массиве $\overline{A}_i^t$, обозначенный как массив $M_{ri}$:

$$\text{ТРАНС}_i(\overline{a_1, a_n})::= [\gamma]\{\text{ТРАНС}_i(l, r)\vec{\text{C}}\}, \tag{12}$$

с помощью которого реализуется последовательное продвижение с обменом в соседних парах (транспозиция) нулевых элементов вправо к крайним позициям в каждом массиве $M_{ri}$.

Таким образом, описанный ранее алгоритм классификации на базе РС, начиная с шага 2, можно записать следующим образом:

$$\text{КЛАСС}(\overline{x_1, x_n}) ::= [\theta] \overset{n}{\underset{j=1}{\text{СРЕЗ}}} (\overline{a_1, a_m}) \times [\theta_k] (\text{НУЛ}(\overline{p_1, p_m}) \vee$$

$$\vee \overset{m}{\underset{i=1}{\text{ТРАНС}}} (\overline{a_1, a_n}))\} \times \text{ВЫВ}(P) \times \text{ФИН}. \qquad (13)$$

В записи (13) с учетом необходимости выполнения операции формирования срезов РС параллельно по всем $n$ столбцам матрицы $\mathbf{A}^t$ и операции транспозиции параллельно по всем $m$ строкам матрицы $\overline{\mathbf{A}}^t$ использовано следующее представление процессов параллельной обработки:

- $\overset{n}{\underset{j=1}{\text{СРЕЗ}}} (\overline{a_1, a_m})$ — параллельное выполнение оператора $\text{СРЕЗ}_j(\overline{a_1, a_m})$ (11) по всем $n$ стомлбцам $M_{cj}$;
- $\overset{m}{\underset{i=1}{\text{ТРАНС}}} (\overline{a_1, a_n})$ — параллельное выполнение оператора $\text{ТРАНС}_i(\overline{a_1, a_n})$ (12) по всем $m$ строкам $M_{ri}$.

Кроме того, в записи (13) оператор $\text{ВЫВ}(P)$ используется для вывода результата процесса классификации, а именно вектора $P$ с одним единичным элементом $p_l$ в соответствии с шагом 5 алгоритма. При записи алгоритма классификации в виде (13) предполагается, что первоначальная матрица $\mathbf{A}^\circ$ вида (3) сформирована до начала описываемого процесса.

Анализ составного оператора вычисления РС вида $\text{СРЕЗ}_j(\overline{a_1, a_m})$ (11) позволяет предположить, что он модифицирован за счет совмещения выполнения операторов $\text{МИН}_j(\overline{a_1, a_m})$ и $\text{ВЫЧ}_j(M, \min)$, например с использованием операции декремента над всеми элементами $(\overline{a_1, a_m})$, но в каждом столбце $M_{cj}$ параллельно. Это значительно ускорит реализацию оператора $\text{СРЕЗ}_j(\overline{a_1, a_m})$.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ записи алгоритма классификации на базе формирования РС в терминах САА В.М. Глушкова, во-первых, подтвердил компактность представления при таком подходе, во-вторых, показал возможность дальнейшего усовершенствования метода обработки двумерных (матричных) массивов данных по РС; в-третьих, продемонстрировал функциональную мощность базиса САА В.М. Глушкова, что позволяет описывать в его терминах сложные алгоритмы, в данном случае алгоритм классификации объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Цейтлин Г.Е. Введение в алгоритмику. — К.: Сфера, 1998. — 310 с.
2. Цейтлин Г.Е. Алгебраическая алгоритмика: теория и приложения // Кибернетика и системный анализ. — 2003. — № 1. — С. 8–18.
3. Андон Ф.И., Дорошенко А.Е., Цейтлин Г.Е., Яценко Е.А. Алгеброалгоритмические модели и методы параллельного программирования. — Киев: Академпериодика, 2007. — 671 с.
4. Андон Ф.И., Дорошенко А.Е., Жереб К.А. Программирование высокопроизводительных параллельных вычислений: формальные модели и графические ускорители // Кибернетика и системный анализ. — 2011. — № 4. — С. 176–187.

5. Андон Ф.И., Дорошенко А.Е., Бекетов А.Г., Иовчев В.А., Яценко Е.А. Инструментальные средства автоматизации параллельного программирования на основе алгебры алгоритмов // Кибернетика и системный анализ. — 2015. — № 1. — С. 162–170.

6. Цейтлин Г.Е., Амонс А.А., Головин О.В., Зубцов А.Ю. Интегрированный инструментарий проектирования и синтеза классов алгоритмов и программ // Кибернетика и системный анализ. — 2000. — № 3. — С. 165–169.

7. Цейтлин Г.Е. Алгебры Глушкова и теория клонов // Кибернетика и системный анализ. — 2003. — № 4. — С. 48–58.

8. Борисов Е.С. Полуавтоматическая система декомпозиции последовательных программ для параллельных вычислителей с распределённой памятью // Кибернетика и системный анализ. — 2004. — № 3. — С. 139–150.

9. Цейтлин Г.Е., Иванов Е.А. Специализированные информационные технологии для лиц с физическими ограничениями // Управляющие системы и машины. — 2008. — № 5. — С. 62–69, 74.

10. Цейтлин Г.Е. Трансформационная сводимость и синтез алгоритмов и программ символьной обработки // Кибернетика и системный анализ. — 2006. — № 5. — С. 165–173.

11. Овсяк В.К., Овсяк О.В. Порівняльний аналіз алгебричних методів запису алгоритмів // Обчислювальні методи і системи перетворення інформації : II наук.-техн. конф., 4-5 жовтня 2012 р.: Зб. наук. праць. — Львів: ФМІ НАНУ, 2012. — С. 117–119.

12. Цейтлин Г.Е. Проектирование последовательных алгоритмов сортировки: классификация, трансформация, синтез // Программирование. — 1989. — № 3. — С. 3–24.

13. Цейтлин Г.Е. Распараллеливание алгоритмов сортировки // Кибернетика. — 1989. — № 6. — С. 67–74.

14. Кожемяко В.П., Мартынюк Т.Б., Хомюк В.В. Особенности структурного программирования синхронных алгоритмов сортировки // Кибернетика и системный анализ. — 2006. — № 5. — С. 122–133.

15. Яценко Е.А. Регулярные схемы алгоритмов адресной сортировки и поиска // Управляющие системы и машины. — 2004. — № 5. — С. 61–66.

16. Мартинюк Т.Б. Рекурсивні алгоритми багатооперандної обробки інформації. Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ — Вінниця, 2000. — 216 с.

17. Мартынюк Т.Б., Хомюк В.В. Мультиобработка массивов данных по разностным срезам // Кибернетика и системный анализ. — 2011. — № 6. — С. 132–137.

18. Мартынюк Т.Б. Модель порогового нейрона на основе параллельной обработки по разностным срезам // Кибернетика и системный анализ. — 2005. — № 4. — С. 78–89.

19. Васюра А.С., Мартинюк Т.Б., Куперштейн Л.М. Методи та засоби нейроподібної обробки даних для систем керування. Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ — Вінниця, 2008. — 175 с.

20. Мартынюк Т.Б., Буда А.Г., Хомюк В.В., Кожемяко А.В., Куперштейн Л.М. Классификатор биомедицинских сигналов // Искусственный интеллект. — 2010. — № 3. — С. 88–95.

21. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания: учеб. пособие. — 3-е изд. — М.: Высш. шк., 1989. — 232 с.

22. Дискриминантный анализ [Электронный ресурс] — Режим доступа: http: // www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stdiscan.html

23. Дискриминантные функции для классификации многомерных объектов [Электронный ресурс] — Режим доступа: http: // masters.donntu.edu.ua/2005/kita/kapystina/ library/disc sub an2.html

24. Справочник по цифровой схемотехнике / В.И. Зубчук, В.П. Сигорский, А.Н. Шкуро. — К.: Техника, 1990. — 448 с.

*Поступила 22.12.2014*