УДК 510.62

Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук

О МОДЕЛИРОВАНИИ АЛФАВИТНЫХ ОПЕРАТОРОВ СРЕДСТВАМИ ТЕОРИИ ИНТЕЛЛЕКТА

Идеи, заложенные в работах [1, 2], нашли дальнейшее развитие в настоящей статье. Опишем процесс дешифровки слов некоторыми алфавитными операторами неарифметического характера.

Пусть $\sigma_{11}\sigma_{21}\ldots\sigma_{m1}$, $\sigma_{12}\sigma_{22}\ldots\sigma_{m2}\ldots$, $\sigma_{1n}\sigma_{2n}\ldots\sigma_{mn}$ — n слов длины m, подлежащих дешифровке. В процессе дешифровки слову $\sigma_{1i}\sigma_{2i}\ldots\sigma_{mi}$ ставится в соответствие буква b_i, причем разным словам соответствуют различные буквы. Введем буквенные переменные $x_1 \in \{a_{11}, a_{12}, \ldots, a_{1k_1}\}$, $x_2 \in \{a_{21}, a_{22}, \ldots, a_{2k_2}\}, \ldots$, $x_m \in \{a_{m1}, a_{m2}, \ldots, a_{mk_m}\}$, $y \in \{b_1, b_2, \ldots, b_n\}$. Оператор дешифровки $y = D(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ запишем

в неявной форме:

$$x_1^{\sigma_{11}} x_2^{\sigma_{21}} \ldots x_m^{\sigma_{m1}} y^{b_1} \vee x_1^{\sigma_{12}} x_2^{\sigma_{22}} \ldots x_m^{\sigma_{m2}} y^{b_2} \vee \ldots \vee x_1^{\sigma_{1n}} x_2^{\sigma_{2n}} \ldots$$
$$\ldots x_m^{\sigma_{mn}} y^{b_n} = 1, \qquad (1)$$

в явной форме:

$$\begin{aligned} x_1^{\sigma_{11}} x_2^{\sigma_{21}} \ldots x_m^{\sigma_{m1}} &= y^{b_1}, \\ x_1^{\sigma_{12}} x_2^{\sigma_{22}} \ldots x_m^{\sigma_{m2}} &= y^{b_2}, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots & \\ x_1^{\sigma_{1n}} x_2^{\sigma_{2n}} \ldots x_m^{\sigma_{mn}} &= y^{b_n}. \end{aligned} \qquad (2)$$

В качестве примера построим дешифратор, нумерующий десятичными цифрами следующие окончания русских имен прилагательных: АЯ, ЯЯ, УЮ, ЮЮ, ОЮ, ЕЮ, ЫЕ, ИЕ, ОЕ, ЕЕ. Неявное описание этого дешифратора имеет вид

$$x_1^{\text{а}} x_2^{\text{я}} y^0 \vee x_1^{\text{я}} x_2^{\text{я}} y^1 \vee x_1^{\text{у}} x_2^{\text{ю}} y^2 \vee x_1^{\text{ю}} x_2^{\text{ю}} y^3 \vee x_1^{0} x_2^{\text{ю}} y^4 \vee$$
$$\vee x_1^{\text{е}} x_2^{\text{ю}} y^5 \vee x_1^{\text{ы}} x_2^{\text{е}} y^6 \vee x_1^{\text{и}} x_2^{\text{е}} y^7 \vee x_1^{0} x_2^{\text{е}} y^8 \vee x_1^{\text{е}} x_2^{\text{е}} y^9 = 1. \qquad (a)$$

Здесь $x_1 x_2$ — окончание; y — его номер. Введенные буквенные переменные имеют следующие области определения: $x_1 \in \{$а, я, у, ю, о, е, ы, и$\}$, $x_2 \in \{$я, ю, е$\}$, $y \in \{0, 1, \ldots, 9\}$.

По явному описанию

$$x_1^{\text{а}} x_2^{\text{я}} = y^0,\ x_1^{\text{я}} x_2^{\text{я}} = y^1,\ x_1^{\text{у}} x_2^{\text{ю}} = y^2,\ x_1^{\text{ю}} x_2^{\text{ю}} = y^3;\ x_1^{\text{о}} x_2^{\text{ю}} = y^4,$$

$$x_1^{\text{е}} x_2^{\text{ю}} = y^5,\ x_1^{\text{ы}} x_2^{\text{е}} = y^6,\ x_1^{\text{и}} x_2^{\text{е}} = y^7;\ x_1^{0} x_2^{\text{е}} = y^8,\ x_1^{\text{е}} x_2^{\text{е}} = y^9 \qquad (б)$$

строим переключательную цепь дешифратора (рис. 1). В ней указаны все каскады преобразования сигналов.

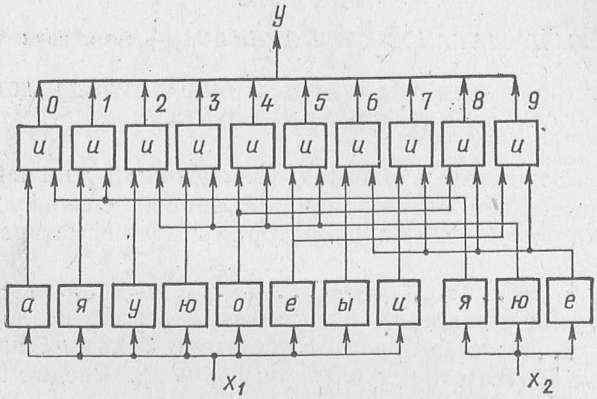

Рис. 1

Опишем теперь обратный процесс шифровки слов. Оператор шифровки $x_1 x_2 \ldots x_m = s(y)$ ставит в соответствие букве b_i слово длины m $\sigma_{1i}\sigma_{2i} \ldots \sigma_{mi}$, где $1 \leqslant i \leqslant n$, причем разным буквам соответствуют различные слова. В неявной форме оператор шифровки описывается тем же уравнением (1), что и оператор дешифровки. В явной форме он может быть представлен следующей системой уравнений:

$$\begin{gathered}
\tau_{111} y^{b_1} \vee \tau_{112} y^{b_2} \vee \ldots \vee \tau_{11n} y^{b_n} = x_1^{a_{11}};\\
\tau_{121} y^{b_1} \vee \tau_{122} y^{b_2} \vee \ldots \vee \tau_{12n} y^{b_n} = x_1^{a_{12}};\\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\tau_{1k_1 1} y^{b_1} \vee \tau_{1k_1 2} y^{b_2} \vee \ldots \vee \tau_{1k_1 n} y^{b_n} = x_1^{a_{1k_1}};\\
\tau_{211} y^{b_1} \vee \tau_{212} y^{b_2} \vee \ldots \vee \tau_{21n} y^{b_n} = x_2^{a_{21}},\\
\tau_{221} y^{b_1} \vee \tau_{222} y^{b_2} \vee \ldots \vee \tau_{22n} y^{b_n} = x_2^{a_{22}};\\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\tau_{2k_2 1} y^{b_1} \vee \tau_{2k_2 2} y^{b_2} \vee \ldots \vee \tau_{2k_2 n} y^{b_n} = x_2^{a_2 k_2}, \qquad (3)\\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\tau_{m11} y^{b_1} \vee \tau_{m12} y^{b_2} \vee \ldots \vee \tau_{m1n} y^{b_n} = x_m^{a_{m1}};\\
\tau_{m21} y^{b_1} \vee \tau_{m22} y^{b_2} \vee \ldots \vee \tau_{m2n} y^{b_n} = x_m^{a_{m2}};\\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\tau_{mk\ 1} y^{b_1} \vee \tau_{mk_m 2} y^{b_2} \vee \ldots \vee \tau_{mk_m n} y^{b_n} = x_m^{a_{mk_m}}.
\end{gathered}$$

Здесь τ_{ijk} — некоторые логические константы, определяемые по формулам

$$\tau_{ijk} = \sigma_{ik}^{a_{ij}}. \tag{4}$$

Индексы i, j, k изменяются в пределах $1 \leqslant i \leqslant m$, $1 \leqslant j \leqslant k_i$, $1 \leqslant k \leqslant n$. В качестве примера построим шифратор, формирующий перечисленные выше окончания имен прилагательных по их номерам. В данном случае имеем

$m = 2$, $n = 10$, $k_1 = 8$, $k_2 = 3$, $a_{11} = $ а, $a_{12} = $ Я, $a_{13} = $ У, $a_{14} = $ Ю, $a_{15} = 0$, $a_{16} = $ Е, $a_{17} = $ Ы, $a_{18} = $ И, $a_{21} = $ Я, $a_{22} = $ Ю, $a_{23} = $ Е, $\sigma_{11} = $ а, $\sigma_{21} = $ Я, $\sigma_{12} = $ Я, $\sigma_{22} = $ Я, $\sigma_{13} = $ У, $\sigma_{23} = $ Ю, $\sigma_{14} = $ Ю, $\sigma_{24} = $ Ю, $\sigma_{15} = 0$, $\sigma_{25} = $ Ю, $\sigma_{16} = $ е, $\sigma_{26} = $ Ю, $\sigma_{17} = $ ы, $\sigma_{27} = $ е, $\sigma_{18} = $ И, $\sigma_{28} = $ е, $\sigma_{19} = 0$, $\sigma_{29} = $ е, $\sigma_{1,10} = $ е, $\sigma_{2,10} = $ е, $b_1 = 0$, $b_2 = 1$, $b_3 = 2$, $b_4 = 3$, $b_5 = 4$, $b_6 = 5$, $b_7 = 6$, $b_8 = 7$, $b_9 = 8$, $b_{10} = 9$.

i	j	k: 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1									
	2		1								
	3			1							
	4				1						
	5					1				1	
	6						1				1
	7							1			
	8								1		
2	1	1	1								
	2			1	1	1	1				
	3							1	1	1	1

По формуле (4) определяем $\tau_{111} = \sigma_{11}^{a_{11}} = a^a = 1$, $\tau_{112} = \sigma_{12}^{a_{11}} = Я^a = 0$. Аналогичным образом найденные константы τ_{ij} при всевозможных значениях i, j, k представлены в таблице. Нулевые значения в ней опущены. Теперь все подготовлено для записи уравнений (3):

$$y^0 = x_1^{\text{а}},\ y^1 = x_1^{\text{я}},\ y^2 = x_1^{\text{у}},\ y^3 = x_1^{\text{ю}},\ y^4 \vee y^8 = x_1^0,\ y^5 \vee y^9 = x_1^{\text{е}},$$
$$y^6 = x_1^{\text{ы}},\ y^7 = x_1^{\text{и}},\ y^0 \vee y^1 = x_2^{\text{я}},\ y^2 \vee y^3 \vee y^4 \vee y^5 =$$
$$= x_2^{\text{ю}},\ y^6 \vee y^7 \vee y^8 \vee y^9 = x_2^{\text{е}}. \tag{в}$$

Соответствующий этим уравнениям шифратор представлен на рис. 2.

Рассмотрим отношение равенства $x = y$ для двух буквенных переменных x, y, изменяющихся в одной и той же области $\{a,$

$a_2, \ldots, a_k\}$. Оно может быть описано в неявном виде следующим каноническим уравнением:

$$x^{a_1}y^{a_1} \vee x^{a_2}y^{a_2} \vee \ldots \vee x^{a_k}y^{a_k} = 1. \qquad (5)$$

В явном виде зависимость переменной y от переменной x выразится следующей системой равенств:

$$x^{a_1} = y^{a_1},\ x^{a_2} = y^{a_2},\ \ldots,\ x^{a_k} = y^{a_k}. \qquad (6)$$

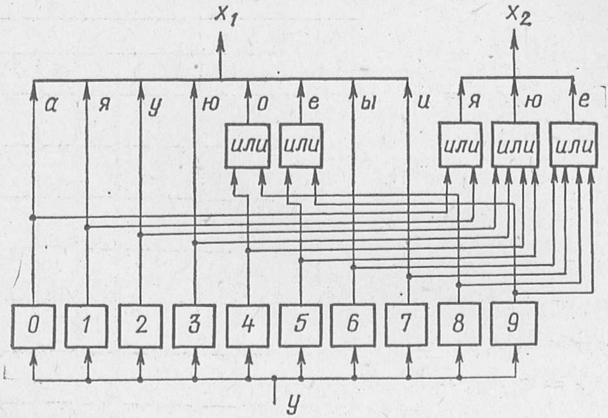

Рис. 2

В переключательной цепи для этой зависимости (рис. 3, *а*) второй каскад преобразования сигналов имеет вид простого пучка параллельных проводов.

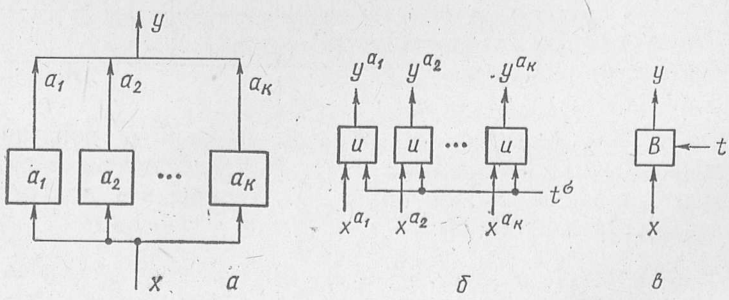

Рис. 3

Если переменные x и y заданы на различных областях A и B, то отношение равенства для них моделируется аналогично, с тем отличием, что в уравнениях и схеме теперь фигурируют лишь те буквы, которые составляют область $A \cap B$. В дальнейшем для краткости введем специальное обозначение

$$x \approx y = x^{a_1} y^{a_1} \vee x^{a_2} y^{a_2} \vee \ldots \vee x^{a_k} y^{a_k} \tag{7}$$

для предиката, стоящего в левой части равенства (5). Предикат $x \approx y$ назовем предикатом равенства для области $\{a_1, a_2, \ldots, a_k\}$ и переменных x, y.

Рассмотрим отношение, описываемое уравнением

$$(x \approx y)\, t^{\sigma} = 1. \tag{8}$$

Назовем его вентильным отношением. Здесь x, y — буквенные переменные, заданные на множестве $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_k\}$, t — буквенная переменная, заданная на множестве $B = \{b_1, b_2, \ldots, b_e\}$, σ — некоторая фиксированная буква из множества B. Выражения зависимости y от x и t для (8) имеют вид:

$$x^{a_1} t^{\sigma} = y^{a_1},\ x^{a_2} t^{\sigma} = y^{a_2}, \ldots,\ x^{a_k} t^{\sigma} = y^{a_k}. \tag{9}$$

Переключательную цепь (рис. 3, *б*), реализующую эти зависимости, назовем вентилем. Условное изображение вентиля показано на рис. 3, *в*. Вход x вентиля — рабочий, вход t — управляющий. Вентиль работает следующим образом: когда на управляющий вход вентиля поступает буква σ, сигнал с рабочего входа беспрепятственно проходит на выход вентиля; когда же $t \neq \sigma$, то на выходе вентиля выходной сигнал отсутствует.

Важно обратить внимание на то, что вентиль реализует частичную функцию: при $t \neq \sigma$ значение ее не существует. Все узнавания переменной y обращаются в нули. Интересно, что средствами комбинационной техники, обычно используемой для построения современных вычислительных машин, так работающий вентиль построить невозможно: с помощью комбинационных схем можно реализовать лишь всюду определенные функции, в данном же случае мы сталкиваемся с частичной функцией. Можно было бы, конечно, как это обычно и делается на практике, превратить частичную функцию во всюду определенную и построить комбинационную схему для нее. Но при этом мы неизбежно исказим принцип работы вентиля. Выходные сигналы теперь будут вырабатываться как при открытом, так и при закрытом вентиле, мы же первоначально хотели, чтобы закрытый вентиль не вырабатывал на своем выходе вообще никаких сигналов. Этим примером демонстрируется важное преимущество переключательных цепей теории интеллекта: в отличие от комбинационных схем, получаемых на базе формул алгебры логики, переключательные цепи способны реализовать настоящие частичные функции, а не их суррогат в виде функций, появляющихся в результате процедуры доопределения.

Рассмотрим уравнение

$$(x_1 \approx y) \vee (x_2 \approx y) \vee \ldots \vee (x_m \approx y) = 1, \tag{10}$$

вводящее отношение сборки. Опишем зависимость переменной y от переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$, определяемую этим отношением:

$$\begin{aligned} &x_1^{a_1} \vee x_2^{a_1} \vee \ldots \vee x_m^{a_1} = y^{a_1}; \\ &x_1^{a_1} \vee x_2^{a_2} \vee \ldots \vee x_m^{a_2} = y^{a_2}; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &x_1^{a_k} \vee x_2^{a_k} \vee \ldots \vee x_m^{a_k} = y^{a_k}. \end{aligned} \tag{11}$$

Переключательную цепь (рис. 4, *а*), реализующую ее, назовем схемой сборки (рис. 4, *б*). Схема сборки предназначена для работы

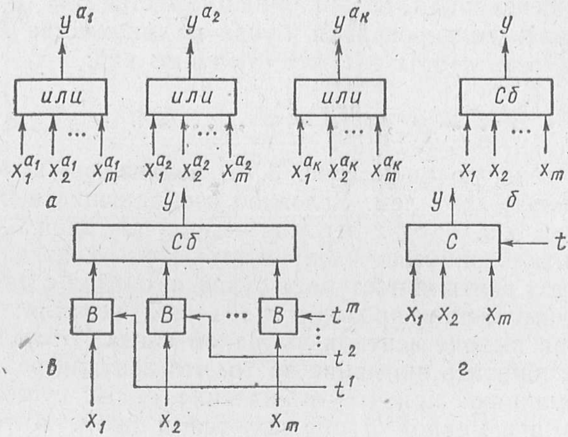

Рис. 4

в условиях, когда на все ее входы либо вообще не подается сигналов, либо входной сигнал поступает только на один из входов. В первом случае схема сборки не формирует никакого выходного сигнала, во втором — передает на выход сигнал, поступивший по одному из входов.

Используя схему сборки и вентили, можно построить переключательную цепь (рис. 4, *в*), выполняющую функции селектора. Условное изображение селектора представлено на рис. 4, *г*. Значениями управляющего сигнала t служат натуральные числа от 1 до m. Если $t = i$, то сигнал с входа x_i передается на выход y. Неявное описание работы селектора имеет вид

$$(x_1 \approx y)\, t^1 \vee (x_2 \approx y)\, t^2 \vee \ldots \vee (x_m \approx y)\, t^m = 1. \tag{12}$$

В явном виде схема селектора описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} &x_1^{a_1} t^1 \vee x_2^{a_1} t^2 \vee \ldots \vee x_m^{a_1} t^m = y^{a_1}; \\ &x_1^{a_2} t^1 \vee x_2^{a_2} t^2 \vee \ldots \vee x_m^{a_2} t^m = y^{a_2}; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &x_1^{a_k} t^1 \vee x_2^{a_k} t^2 \vee \ldots \vee x_m^{a_k} t^m = y^{a_k}. \end{aligned} \tag{13}$$

Решая уравнение (12) относительно переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$, находим выражения для зависимости этих переменных от y и t:

$$y^{a_i}t^1 = x_1^{a_i},\ y^{a_i}t^2 = x_2^{a_i},\ \ldots,\ y^{a_i}t^m = x_m^{a_i}, \tag{14}$$

где индекс i пробегает значения от 1 до k. Цепь (рис. 5, *а*), реализующую систему равенств (14), назовем переключателем. Обозначение переключателя приведено на рис. 5, *б*. Действие переключателя состоит в том, что он при подаче на управляю-

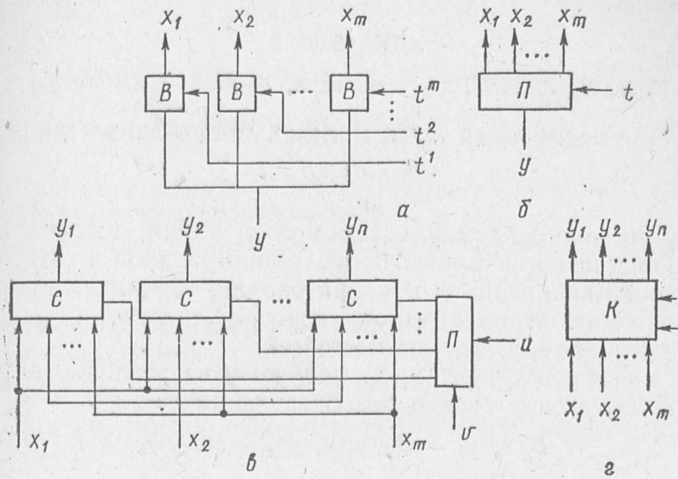

Рис. 5

щий вход t сигнала $i\,(1 \leqslant i \leqslant m)$ передает сигнал со входа y на i-й по счету выходной канал x_i.

На рис. 5, *в* показана переключательная цепь, которую мы назовем коммутатором на m входов и n выходов. В состав схемы коммутатора входит один переключатель на n входов и n селекторов на m входов каждый. Коммутатор имеет два управляющих входа u и v, на которые поступают номера i и j $(1 \leqslant i \leqslant m,$ $1 \leqslant j \leqslant n)$ соответственно входа x_i и выхода y_i, соединяемых коммутатором. Когда $u = i$, $v = j$, коммутатор осуществляет передачу сигнала со входа x_i на выход y_j. На остальных своих выходах коммутатор не формирует при этом никаких сигналов. Условное обозначение коммутатора показано на рис. 5, *г*.

При неявном задании работа коммутатора опишется в виде уравнения

$$\bigvee_{(i,\,j)} (x_i \approx y_j)\, u^i v^j = 1. \tag{15}$$

Здесь запись $(i,\ j)$ под знаком дизъюнкции означает, что логическое суммирование ведется для всевозможных пар индексов i и j, где $1 \leqslant i \leqslant m$, $1 \leqslant j \leqslant n$. Явное задание коммутатора можно получить описанными ранее приемами по уравнению (15), кроме того, его легко получить по схеме, поэтому здесь мы его не приводим.

Список литературы: 1. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* О моделировании переключательных функций и алфавитных операторов.— АСУ и приборы автоматики, 1980, вып. 57, с. 63—70. 2. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* О моделировании арифметических операций.— Проблемы бионики, 1980, вып. 25, с. 22—30.

Поступила 15 октября 1979 г.

УДК 62.506.2

Е. П. ПУТЯТИН, д-р техн. наук, *Т. Г. ДОЛЖЕНКОВА*

НОРМАЛИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

СООБЩЕНИЕ 1

В статье описаны результаты исследований, начатых ранее [1, 2]. Предлагается новый более общий подход к отысканию параметров нелинейных преобразований, заключающийся в определении этих параметров непосредственно, а не путем использования обратных зависимостей.

Пусть изображение $B(x, y)$ получено из эталонного изображения $B_0(x, y)$ с помощью преобразования

$$B(x, y) = B_0(u(x, y), v(x, y)), \tag{1}$$

где $u(x, y)$, $v(x, y)$ представляются некоторыми сепарабельными соотношениями

$$u(x, y) = \sum_i a_i f_i(x, y); \quad v(x, y) = \sum_j b_j g_j(x, y), \tag{2}$$

a_i, b_j — неизвестные коэффициенты ($i, j = 1, 2, \ldots$).

Для определения параметров a_i и b_j строим интегральные функционалы вида (заданы в пространстве L^2)

$$\iint_D B_0(u, v) K(u, v)\, du dv = \iint_D B(x, y) K(u(x, y), v(x, y)) \left| I(x, y) \right| dx dy. \tag{3}$$

Здесь якобиан $I(x, y)$ определяется следующим образом:

$$I(x, y) = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_i a_i \frac{\partial f_i}{\partial x} & \sum_i a_i \frac{\partial f_i}{\partial y} \\ \sum_j b_j \frac{\partial g_j}{\partial x} & \sum_j b_j \frac{\partial g_j}{\partial y} \end{vmatrix} =$$

$$= \sum_{i, j} a_i b_j \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \frac{\partial g_j}{\partial y} - \frac{\partial g_j}{\partial x} \frac{\partial f_i}{\partial y} \right).$$