

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.396:681.2

В. Ю. КОБЕНКО

Омский государственный  
технический университет

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ С РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ

Описаны основные законы выполнения операций с распределениями случайных сигналов в области идентификационных чисел.

**Ключевые слова:** идентификационная шкала, идентификационная операция, измерение формы, распределение, сигнал.

При анализе и обработке сигналов часто возникает проблема, связанная с формальным описанием их взаимодействия, например, в результате сложения или умножения. Технология выполнения подобных операции известна, если известны математические модели сигналов, но чаще всего модели взаимодействующих сигналов неизвестны, поскольку сами сигналы носят случайный характер [1, 2]. Задача еще более усложняется, если количество взаимодействующих сигналов больше двух. Возникает вопрос — как аналитическим путем описать результат взаимодействия нескольких случайных сигналов, имеющих минимальное количество известных параметров?

В настоящее время данный вопрос решен частично в отношении случайных сигналов, имеющих, например, нормальный или равномерный законы распределения. Однако для случайных сигналов с произвольным законом распределения вопрос

аналитического описания результата их взаимодействия остается открытым.

Одно из перспективных направлений в решении данного вопроса связано с развитием *теории идентификационных измерений* [3–5], основанной на измерении формы сигнала или его характеристики (например, закона распределения). При этом сигнал рассматривается как нечто целое, характеризующееся не отдельными параметрами (точечными характеристиками), а распределением значений (массивом). Каждому распределению (массиву) по определенному закону ставится в соответствии число, названное идентификационным, характеризующее форму сигнала или его характеристики [6, 7]. Идентификационные числа находятся с помощью методов, описанных, например, в [8–10].

В ряде публикаций показана возможность выполнения операций над распределениями случайных

сигналов в области идентификационных чисел: сложение [11, 12], умножение [13, 14], многократное сложение [15] и многократное умножение [16] распределений. Такие операции были названы идентификационными.

**Цель данной работы:** выяснить, какие математические законы при выполнении идентификационных операций над распределениями случайных чисел действуют.

**Постановка задачи и методика исследований.** В классической алгебре существуют законы, которые действуют при выполнении операций над числами: переместительный, сочетательный, распределительный. Проверим справедливость этих законов при выполнении операций над идентификационными числами.

Общая методика проведения исследований заключается в следующем. С помощью управляемого программного генератора будут генерироваться реализации случайных стационарных сигналов  $X(t)$ ,  $Y(t)$  и  $Z(t)$  в виде распределения мгновенных значений [17]. Для большей достоверности и статистической устойчивости результатов исследований в качестве тестовых сигналов были взяты случайные стационарные сигналы с симметричными законами распределения: двумодальным (2МОД), арксинусным (АРКС), равномерным (РАВН), треугольным (СИМП) нормальным (НОРМ) и Коши (КОШИ). Объем каждой реализации  $N=10\,000$ , количество усреднений результатов вычислений для одних и тех же исходных сигналов — 2 000. Затем, в соответствии с алгоритмом, описанным в [18], определяются значения идентификационных чисел  $NF_x$ ,  $NF_y$  и  $NF_z$  этих сигналов. Указанные выше законы распределения охватывают максимальный диапазон изменения параметра  $NF$  (табл. 1) [19]. Далее производятся операции над реализациями сигналов во временной области и соответствующие им идентификационные операции над идентификационными числами  $NF$  этих сигналов. Полученный результат анализируется.

Идентификационные операции будем обозначать в круглых скобках:  $(+)$  — идентификационное сложение,  $(\times)$  — идентификационное умножение.

#### Результаты исследований.

**Переместительный закон идентификационного сложения** чисел в пространстве  $NF$  будет иметь вид:

$$NF_x(+ )NF_y = NF_y(+ )NF_x. \quad (1)$$

Справедливость данного равенства доказывается следующим образом. Операция идентификационного сложения чисел  $NF_x$  и  $NF_y$  имеет свое отображение во временной области в виде сложения мгновенных значений сигналов  $X(t)$  и  $Y(t)$  (рис. 1а), соответствующих этим идентификационным числам. Т. к. в классической алгебре действует переместительный закон сложения, то  $X(t)+Y(t) = Y(t)+X(t) = Z(t)$ , т. е. результат сложения — сигнал  $Z(t)$ . Следовательно, левая и правая части выражения (1) будут представлять собой отображение одного и того же сигнала  $Z(t)$  в области идентификационного параметра  $NF$ .

**Переместительный закон идентификационного умножения** чисел в пространстве  $NF$  будет иметь вид:

$$NF_x(\times)NF_y = NF_y(\times)NF_x. \quad (2)$$

Доказательство справедливости действия данного закона аналогично доказательству для переместительного закона идентификационного сложения.

Операция идентификационного умножения чисел  $NF_x$  и  $NF_y$  имеет свое отображение во временной области в виде умножения мгновенных значений сигналов  $X(t)$  и  $Y(t)$  (рис. 1б), соответствующих этим идентификационным числам. Т. к. в классической алгебре действует переместительный закон умножения, то  $X(t)\cdot Y(t) = Y(t)\cdot X(t) = Z(t)$ , т. е. результат умножения — это сигнал  $Z(t)$ . Следовательно, левая и правая части выражения (2) будут представлять собой отображение одного и того же сигнала  $Z(t)$  в области идентификационного параметра  $NF$ .

**Сочетательный закон идентификационного сложения** чисел в пространстве  $NF$  будет иметь вид:

$$[NF_x(+ )NF_y](+ )NF_z = NF_x(+ )[NF_y(+ )NF_z]. \quad (3)$$

Квадратные скобки определяют приоритет выполнения операций. Во временной области выражение (3) будет представлено в виде:

$$[X(t)+Y(t)] + Z(t) = X(t) + [Y(t)+Z(t)], \quad (4)$$

где левая и правая части выражения — это один и тот же сигнал. Пусть сигналы, полученные в результате суммирования  $X(t)+Y(t)$  и  $Y(t)+Z(t)$  во временной области, отображаются в области  $NF$  в виде идентификационных чисел  $NF_{xy} = NF_x(+ )NF_y$  и  $NF_{yz} = NF_y(+ )NF_z$  соответственно. Тогда выражение (3) преобразуется к виду:

$$NF_{xy}(+ )NF_z = NF_x(+ )NF_{yz}. \quad (5)$$

Задача сводится к тому, чтобы проверить справедливость выражения (5). Общая методика проведения исследований сочетательного закона идентификационного сложения добавлена следующими пунктами:

1) после формирования сигналов задается их отношение размахов  $R_x/R_y$  и формируется реализация сигнала  $XY(t)=X(t)+Y(t)$  (рис. 1а). Определяются значения размаха  $R_{xy}$ , идентификационного параметра  $NF_{xy}$  и дисперсии  $D_{xy}$  этого сигнала;

2) задается отношение размахов сигналов  $R_{xy}/R_z$  и формируется реализация суммарного сигнала  $XY(t)+Z(t)$ . Определяются значения размаха  $R_{sum1}$ , идентификационного параметра  $NF_{sum1}$  и дисперсии  $D_{sum1}$  суммарного сигнала;

3) определяются значения размахов  $R_x$ ,  $R_y$  и  $R_z$  идентификационных параметров  $NF_x$ ,  $NF_y$  и  $NF_z$  и дисперсий  $D_x$ ,  $D_y$  и  $D_z$  исходных сигналов  $X(t)$ ,  $Y(t)$  и  $Z(t)$ ;

4) используя операцию идентификационного сложения, вычисляются значения идентификационных чисел  $NF_{xy} = NF_x(+ )NF_y$  и  $NF_{yz} = NF_y(+ )NF_z$ . Затем, вычисляются значения  $NF_{sum2} = NF_{xy}(+ )NF_z$  и  $NF_{sum3} = NF_x(+ )NF_{yz}$  суммарного сигнала;

5) отношения размахов суммируемых сигналов меняются и пункты 1–5 данной методики повторяются;

6) после многократного повторения исследований для одних и тех же сигналов, реализации которых при каждом повторении обновлялись, находятся погрешности вычисления  $NF_{sum2}$  и  $NF_{sum3}$  относительно  $NF_{sum1}$ , принятого за истинное значение, и вычисляется разность между  $NF_{sum2}$  и  $NF_{sum3}$ , тем самым оценивается степень неравенства левой и правой частей выражений (3) и (5).

Диапазон изменения отношения размахов  $R_x/R_y$  и  $R_{xy}/R_z$  задавался от 0,001 до 1000. Результаты исследования сочетательного закона идентификационного сложения в области параметра  $NF$  представлены

Идентификационная шкала NF-метода

NF	Сигнал X(t)	Закон распределения f(x)	Объем данных N	Описание
0			N=1	Одно значение в сигнале
1			N ≥ 2	Постоянный во времени сигнал
2			N=2	Два значения в сигнале, причем A ≠ B
3			N=3	Три значения в сигнале, причем два из них равны: x <sub>1</sub> = x <sub>3</sub> = A
			N=4	Четыре значения в сигнале, попарно равные между собой: x <sub>1</sub> = x <sub>2</sub> = A, x <sub>3</sub> = x <sub>4</sub> = B
3...4			N=3	Три значения в сигнале, все отличаются друг от друга x <sub>1</sub> ≠ x <sub>2</sub> ≠ x <sub>3</sub>
			N ≥ 5	Двумодальный закон распределения (симметричный и асимметричный), N соизмеримо с 1.
4			N=3	Три значения, причем одно есть полусумма двух других: x <sub>3</sub> = (x <sub>1</sub> + x <sub>2</sub> )/2
			N=4	Четыре значения в сигнале, три из которых равны между собой: x <sub>1</sub> = x <sub>2</sub> = x <sub>3</sub> = A и x <sub>4</sub> = B ≠ A
			N ≫ 1	Двумодальный закон (симметричный). Число значений A равно числу значений B
4...6			N ≫ 1	Двумодальный закон (асимметричный). Число значений A не равно числу значений B
8			N @ ¥	Арксинусный закон распределения
12			N @ ¥	Равномерный закон распределения
24			N @ ¥	Треугольный закон распределения
40...100			N @ ¥	Нормальный закон распределения
100... N/4			N @ ¥	Закон распределения Лапласа
N/4...N			N @ ¥	Закон распределения Коши (односторонний)

Идентификационная шкала NF-метода

NF	Сигнал X(t)	Закон распределения f(x)	Объем данных N	Описание
N			N > 1	Все значения равны A, кроме одного значения, равного B
N...2N			N → ∞	Закон распределения Коши (симметричный и асимметричный)
2(N-1)			N > 1	Все значения равны B, кроме двух, равных A и C. Причем  B-A = B-C

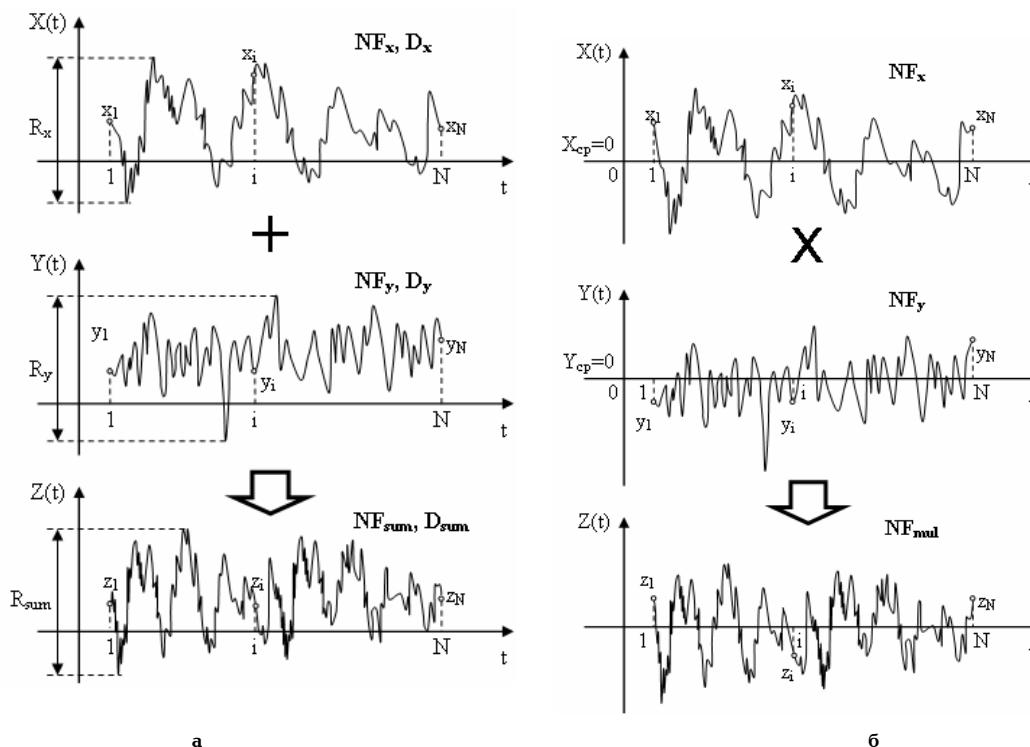


Рис. 1. Технология сложения (а) и умножения (б) реализаций двух сигналов X(t) и Y(t) объема N во временной области.

Z(t) — результирующий сигнал. R<sub>x</sub>, R<sub>y</sub>, R<sub>sum</sub> — размахи, D<sub>x</sub>, D<sub>y</sub>, D<sub>sum</sub> — дисперсии, NF<sub>x</sub>, NF<sub>y</sub>, NF<sub>sum</sub>, NF<sub>mul</sub> — идентификационные параметры сигналов

в табл. 2, где отражены наибольшие значения средних относительных погрешностей вычисления NF<sub>sum2</sub> и NF<sub>sum3</sub> относительно истинного значения NF<sub>sum</sub> суммарного сигнала (столбцы «NF<sub>sum2</sub> NF<sub>sum3</sub>») и относительно друг друга (столбцы «NF<sub>sum2</sub><sup>1</sup> NF<sub>sum3</sub>»), найденные с доверительной вероятностью 0,95 при ширине доверительного интервала 2s для комбинаций сигналов с законами распределения: 2МОД, АРКС, РАВН и СИМП (столбец «2МОД-СИМП»); 2МОД, АРКС, РАВН, СИМП и НОРМ (столбец «2МОД-НОРМ»); 2МОД, АРКС, РАВН, СИМП, НОРМ и КОШИ (столбец «2МОД-КОШИ»). В строке «ИТОГО» представлены наибольшие значения для каждого столбца.

Таким образом, разность между вычисленными значениями NF<sub>sum2</sub> и NF<sub>sum3</sub> (т.е. между значениями левой и правой части выражения (3)) для сигналов:

— с ограниченными распределениями: 2МОД, АРКС, РАВН и СИМП составляет порядка 0,5 %;

— с распределениями: 2МОД, АРКС, РАВН, СИМП и НОРМ составляет порядка 1 %;

— с распределениями: 2МОД, АРКС, РАВН, СИМП, НОРМ и КОШИ составляет порядка 2 %.

На основании результатов исследований можно утверждать, что выражение (3) справедливо в вероятностном смысле (с погрешностью порядка 2 %), что подтверждает правомочность сочетательного закона идентификационного сложения.

**Сочетательный закон идентификационного умножения** чисел в пространстве NF будет иметь вид:

$$[NF_x(x)NF_y(x)NF_z = NF_x(x)[NF_y(x)NF_z]. \quad (6)$$

Квадратные скобки определяют приоритет выполнения операций. Во временной области выражение (6) будет иметь вид:

$$[X(t) \cdot Y(t)] \cdot Z(t) = X(t) \cdot [Y(t) \cdot Z(t)], \quad (7)$$

где левая и правая части выражения — это один и тот же сигнал. Пусть сигналы, полученные в результате

**Наибольшее значение средней относительной погрешности ( $\delta_m$ ) выполнения сочетательного закона идентификационного сложения в области параметра  $NF$  с доверительной вероятностью 0,95 ( $2\sigma_m$  — наибольшая ширина доверительного интервала)**

Распределение	2МОД-СИМП				2МОД-НОРМ				2МОД-КОШИ			
	$NF_{sum2}, NF_{sum3}$		$NF_{sum2} \neq NF_{sum3}$		$NF_{sum2}, NF_{sum3}$		$NF_{sum2} \neq NF_{sum3}$		$NF_{sum2}, NF_{sum3}$		$NF_{sum2} \neq NF_{sum3}$	
	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$
2МОД	1,1	5,6	0,53	2,83	3,9	15	1,1	5,8	4,4	49	1,5	10
АРКС	1,7	7,4	0,37	2,3	4,9	16	0,73	4,1	5,8	47	1,7	12
РАВН	2,1	8,1	0,26	2,2	5,7	17	0,53	3,6	5,7	43	1,7	12
СИМП	3,4	11	0,27	2,5	6,6	19	0,35	3,2	33	37	1,4	11
НОРМ	—	—	—	—	7,4	22	0,48	3,6	7,4	38	0,96	7,4
КОШИ	—	—	—	—	—	—	—	—	8,6	57	1,9	9,7
<b>ИТОГО</b>	<b>3,4</b>	<b>11</b>	<b>0,53</b>	<b>2,83</b>	<b>7,4</b>	<b>22</b>	<b>1,1</b>	<b>5,8</b>	<b>33</b>	<b>57</b>	<b>1,9</b>	<b>12</b>

Таблица 3

**Наибольшее значение средней относительной погрешности ( $\delta_m$ ) выполнения сочетательного закона идентификационного умножения в области параметра  $NF$  с доверительной вероятностью 0,95 ( $2\sigma_m$  — наибольшая ширина доверительного интервала)**

Распределение	2МОД-СИМП				2МОД-НОРМ			
	$NF_{mul2}, NF_{mul3}$		$NF_{mul2} \neq NF_{mul3}$		$NF_{mul2}, NF_{mul3}$		$NF_{mul2} \neq NF_{mul3}$	
	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$	$\delta_m, \%$	$2\sigma_m, \%$
2МОД	6,5	15	5,1	1,5	44	57	5,1	1,5
АРКС	24	20	19	2,4	32	55	19	7,1
РАВН	8,2	23	4,5	2,2	26	55	24	8,1
СИМП	23	28	23	2,7	25	57	23	8,4
НОРМ	—	—	—	—	44	73	19	12
<b>ИТОГО</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>23</b>	<b>2,7</b>	<b>44</b>	<b>73</b>	<b>24</b>	<b>12</b>

перемножения  $X(t) \cdot Y(t)$  и  $Y(t) \cdot Z(t)$  во временной области, отображаются в области  $NF$  в виде идентификационных чисел  $NF_{xy} = NF_x(x)NF_y$  и  $NF_{yz} = NF_y(x)NF_z$  соответственно. Тогда выражение (6) преобразуется к виду:

$$NF_{xy}(x)NF_z = NF_x(x)NF_{yz}. \quad (8)$$

Задача сводится к тому, чтобы проверить справедливость выражения (8). Методика проведения исследований схожа с методикой исследования сочетательного закона идентификационного сложения, но отличается следующим:

- 1) для реализации сигнала  $XY(t) = X(t) \cdot Y(t)$  (рис. 16) определяется значение идентификационного параметра  $NF_{xy}$ ;
- 2) формируется реализация сигнала  $XY(t) \cdot Z(t)$  и определяется значение идентификационного параметра  $NF_{mul}$  этого сигнала;
- 3) используя операцию идентификационного умножения чисел  $NF_{xy} = NF_x(x)NF_y$  и  $NF_{yz} = NF_y(x)NF_z$ . Затем вычисляются значения  $NF_{mul2} = NF_{xy}(x)NF_z$  и  $NF_{mul3} = NF_x(x)NF_{yz}$  результирующего сигнала;
- 4) после многократного повторения исследований для одних и тех же сигналов, реализации которых при каждом повторении обновлялись, находятся погрешности вычисления  $NF_{mul2}$  и  $NF_{mul3}$  относительно  $NF_{mul}$  принятого за истинное значение, и вычисляется разность между  $NF_{mul2}$  и  $NF_{mul3}$ , тем самым оценива-

ется степень неравенства левой и правой частей выражений (6) и (8).

Результаты исследования сочетательного закона идентификационного умножения в области параметра  $NF$  представлены в табл. 3, где отражены наибольшие значения средних относительных погрешностей вычисления  $NF_{mul2}$  и  $NF_{mul3}$  относительно истинного значения  $NF_{mul}$  результирующего сигнала (столбцы « $NF_{mul2}, NF_{mul3}$ ») и относительно друг друга (столбцы « $NF_{mul2}^{-1}NF_{mul3}$ »), найденные с доверительной вероятностью 0,95 при ширине доверительного интервала  $2s$  для комбинаций сигналов с законами распределения: 2МОД, АРКС, РАВН и СИМП (столбец «2МОД-СИМП»); 2МОД, АРКС, РАВН, СИМП и НОРМ (столбец «2МОД-НОРМ»). В строке «ИТОГО» представлены наибольшие значения для каждого столбца.

Таким образом, разность между вычисленными значениями  $NF_{mul2}$  и  $NF_{mul3}$  (т.е. между значениями левой и правой части выражения (6)) для сигналов с распределениями 2МОД, АРКС, РАВН, СИМП и НОРМ составляет порядка 24 %.

На основании результатов исследований можно утверждать, что выражение (6) справедливо в вероятностном смысле (с погрешностью порядка 24 %), что подтверждает правомочность сочетательного закона идентификационного умножения.

**Распределительный закон идентификационного умножения относительно идентификационного сложения чисел в пространстве  $NF$  будет иметь вид:**

Основные законы выполнения операций с распределениями в NF-пространстве идентификационных чисел

Название закона	Классическая алгебра (числа $A, B, C \in R$ )	Пространство идентификационных чисел ( $X, Y, Z$ — сигналы с $NF_x, NF_y, NF_z$ ; $K_0, L_0, M_0$ — сигналы в виде одного значения с $NF=0$ ; $K_1$ — постоянный во времени сигнал с $NF=1$ )	
		Описание закона	Отображение во временной области
Переместительный закон сложения	$A+B=B+A$	$NF_x(+ )NF_y=N F_y(+ )NF_x$	$X+Y=Y+X$
Переместительный закон умножения	$AB=BA$	$NF_x(\times )NF_y=N F_y(\times )NF_x$	$XY=YX$
Сочетательный закон сложения	$(A+B)+C=A+(B+C)$	$[NF_x(+ )NF_y](+ )NF_z=N F_x(+ )[NF_y(+ )NF_z]$	$(X+Y)+Z=X+(Y+Z)$
Сочетательный закон умножения	$(AB)C=A(BC)$	$[NF_x(\times )NF_y](\times )NF_z=N F_x(\times )[NF_y(\times )NF_z]$	$(XY)Z=X(YZ)$
Распределительный закон умножения относительно сложения	$(A+B)C=AC+BC$	$[NF_x(+ )NF_y](\times )NF_z=N F_x(\times )NF_y(+ )NF_z$	$(X+Y)Z=XZ+YZ$
Свойство нуля	$A+0=A$	$NF_x(+ )0=0$ $NF_x(\times )0=0$	$X(t)+K_0=L_0$ $X(t) \cdot K_0=M_0$
Свойство единицы	$A \cdot 1=A$	$NF_x(+ )1=N F_x$ $NF_x(\times )1=N F_x$	$X+K_1=Y(NF_x=N F_y)$ $X \cdot K_1=Z(NF_x=N F_z)$

$$[NF_x(+ )NF_y](\times )NF_z=N F_x(\times )NF_y(+ )NF_z \quad (9)$$

Квадратные скобки определяют приоритет выполнения операций. Во временной области выражение (9) будет представлено в виде:

$$[X(t)+Y(t)] \cdot Z(t)=X(t) \cdot Z(t)+Y(t) \cdot Z(t), \quad (10)$$

где левая и правая части выражения — это один и тот же сигнал. Пусть сигналы, полученные в результате суммирования  $X(t)+Y(t)$  и перемножения  $X(t) \cdot Z(t)$  и  $Y(t) \cdot Z(t)$  во временной области, отображаются в области NF в виде идентификационных чисел  $NF_{xy}=NF_x(+ )NF_y$ ,  $NF_{xz}=NF_x(\times )NF_z$  и  $NF_{yz}=NF_y(\times )NF_z$  соответственно. Тогда выражение (9) преобразуется к виду:

$$NF_{xy}(\times )NF_z=N F_{xz}(+ )NF_{yz} \quad (11)$$

Задача сводится к тому, чтобы проверить справедливость выражения (11). Методика и технология проведения исследований схожа с методикой и технологией исследования сочетательных законов идентификационного сложения и умножения.

В ходе проведения исследований были получены результаты, подтверждающие справедливость действия распределительного закона идентификационного умножения относительно идентификационного сложения.

**Свойство идентификационного нуля** в пространстве NF. Т.к.  $NF=0$  имеет сигнал, состоящий из одного мгновенного значения (см. табл. 1), то его взаимодействие (сложение или умножение) во временной области с любым другим сигналом  $X(t)$  будет давать результирующий сигнал, состоящий из одного мгновенного значения и имеющий  $NF=0$ . Формально данное взаимодействие сигналов в пространстве NF можно представить в виде:

$$NF_x(+ )0=0; NF_x(\times )0=0, \quad (12)$$

что эквивалентно действию во временной области:

$$X(t)+K_0=L_0; X(t) \cdot K_0=M_0, \quad (13)$$

где  $K_0, L_0, M_0$  — сигналы, состоящие из одного мгновенного значения и имеющие  $NF=0$ .

**Свойство идентификационной единицы** в пространстве NF. Т.к.  $NF=1$  имеет сигнал постоянный во времени (см. табл. 1), то его взаимодействие (сложение или умножение) во временной области с любым другим сигналом  $X(t)$  будет давать результирующий сигнал, по форме совпадающий с  $X(t)$  и имеющий значение NF, равное  $NF_x$ . Формально данное взаимодействие сигналов в пространстве NF можно представить в виде:

$$NF_x(+ )1=N F_x; NF_x(\times )1=N F_x, \quad (14)$$

что эквивалентно действию во временной области:

$$X(t)+K_1=Y(t) \text{ при } NF_x=N F_y;$$

$$X(t) \cdot K_1=Z(t) \text{ при } NF_x=N F_z, \quad (15)$$

где  $K_1$  — постоянный во времени сигнал.

**Выводы.** При выполнении операций над распределениями в области идентификационных чисел действуют следующие законы классической алгебры: переместительный закон сложения и умножения, сочетательный закон сложения и умножения, распределительный закон умножения относительно сложения. Свойства нуля и единицы в классической алгебре несколько отличаются от свойств нуля и единицы в пространстве идентификационных чисел (табл. 4).

Введение операций над идентификационными числами и законов их выполнения позволяет аналитически, не проводя экспериментов, описать результат взаимодействия сигналов (в том числе случайных), имеющих минимальное количество известных параметров.

**Библиографический список**

1. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. — М.: Мир, 1969. — 395 с.
2. Губарев, В. В. Алгоритмы спектрального анализа случайных сигналов: моногр. / В. В. Губарев. — Новосибирск: НГТУ, 2005. — 660 с.

3. Кликушин, Ю. Н. Основы идентификационных измерений / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Деп. в ВИНТИ, № 1540-В2006, Омский гос. техн. ун-т. — Омск, 2006. — 18 с.
4. Кликушин, Ю. Н. Основы идентификационных измерений [Электронный ресурс] / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Журнал радиоэлектроники. — 2006. — № 11. — Режим доступа: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).
5. Кликушин, Ю. Н. Основы идентификационных измерений / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2009. — № 2 (80). — С. 174–179.
6. Кобенко, В. Ю. Идентификационные измерения: методы, модели, технологии : моногр. / В. Ю. Кобенко. — Омск : ОмГТУ, 2014. — 208с.
7. Гуменюк, А. С. Алгоритмы анализа структуры сигналов и данных : моногр. / А. С. Гуменюк, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко, В. Н. Цыганенко. — Омск : ОмГТУ, 2010. — 272 с.
8. Кобенко, В. Ю. Фрактальная идентификационная шкала / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2009. — № 3 (83). — С. 205–213.
9. Кобенко, В. Ю. Фрактальная идентификационная плоскость Vz-метода / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2010. — № 1 (87). — С. 213–223.
10. Губарев, В. В. Классификационные измерения: методы и реализация / В. В. Губарев, А. А. Горшенков, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Автотметрия. — 2013. — № 2. — С. 76–84.
11. Кобенко, В. Ю. Операция сложения распределений сигналов в пространстве идентификационных чисел [Электронный ресурс] / В. Ю. Кобенко // Журнал радиоэлектроники. — 2012. — № 4. — Режим доступа: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).
12. Кобенко, В. Ю. Моделирование операции идентификационного сложения распределений случайных сигналов / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2012. — № 2 (110). — С. 304–309.
13. Кобенко, В. Ю. Операция умножения распределений случайных сигналов в пространстве идентификационных чисел

[Электронный ресурс] / В. Ю. Кобенко // Журнал радиоэлектроники. — 2012. — № 3. — Режим доступа: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).

14. Кобенко, В. Ю. Моделирование операции идентификационного умножения распределений случайных сигналов / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2012. — № 3 (113). — С. 302–305.
15. Кобенко, В. Ю. Операция умножения распределения случайного сигнала на число в пространстве идентификационных чисел / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2013. — № 1 (117). — С. 243–247.
16. Кобенко, В. Ю. Идентификация произведения сигналов в области идентификационных чисел / В. Ю. Кобенко // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. — Омск : ОмГУПС, 2013. — С. 191–196.
17. Генератор случайных сигналов с заданным законом распределения : свидетельство о регистрации электронного ресурса № 17515 / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко. — Свидет. о гос. рег. № 50201151369 от 25.10.2011.
18. Кликушин, Ю. Н. Фрактальная шкала для измерения распределений вероятности [Электронный ресурс]. / Ю. Н. Кликушин // Журнал радиоэлектроники — 2000. — № 3. — Режим доступа: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).
19. Кобенко, В. Ю. Определение диапазона идентификационной шкалы форм распределений / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2013. — № 3 (123). — С. 235–240.

**КОБЕНКО Вадим Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».  
Адрес для переписки: [kobra\\_vad@rambler.ru](mailto:kobra_vad@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 30.06.2014 г.  
© В. Ю. Кобенко

## Книжная полка

**Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в SIMULINK : учеб. пособие для вузов по направлению подгот. 210700 «Информационные технологии и системы связи» квалификации (степени) «бакалавр» и квалификации (степени) «магистр» / А. И. Солонина. — СПб. : БХВ-Петербург, 2012. — 425 с. — ISBN 978-5-9775-0686-1.**

Учебное пособие посвящено технологии создания SIMULINK-моделей и моделирования динамических систем цифровой обработки сигналов (ЦОС) с использованием базовых методов и алгоритмов ЦОС. Для облегчения работы начинающих пользователей даны основы моделирования в Simulink. Подробно описана технология создания Simulink-моделей дискретных и цифровых сигналов, специфика их обработки и анализа в процессе моделирования. Рассмотрены математические модели и Simulink-модели линейных дискретных систем, систем цифровой фильтрации с КИХ и БИХ-фильтрами различных структур, в том числе с фиксированной точкой, многоскоростных систем с полифазными структурами, а также средства вычисления дискретного преобразования Фурье на основе быстрого преобразования Фурье.

**Евтянов, С. И. Избранные статьи / С. И. Евтянов ; сост. В. Н. Кулешов. — М. : МЭИ, 2013. — 304 с. — ISBN 978-5-383-00870-6.**

Выпускаемая к столетию со дня рождения выдающегося российского ученого и педагога, основателя научно-педагогической школы МЭИ в области теории колебаний и радиопередающих устройств, лауреата Сталинской премии, доктора технических наук профессора Сергея Ивановича Евтянова — эта книга содержит научные статьи, написанные в разное время им самим и в соавторстве за период с 1936 по 1976 г. В статьях излагаются разработанные им методы прикладной теории колебаний и примеры их применения для решения задач радиотехники. Эти методы продолжают успешно использоваться в научных исследованиях и инженерных разработках. Сборник адресован и будет несомненно интересен и полезен научным работникам, преподавателям вузов, аспирантам и студентам радиотехнических и радиофизических направлений, использующим в своей работе прикладные методы теории колебаний.

## ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ

Описаны способ и устройство, предназначенные для комплексного измерения энергетических, частотно-временных и структурных параметров сигналов.

**Ключевые слова:** идентификационная шкала, измерение параметров сигналов, модель, периодические и случайные сигналы, характеристическая частота.

В настоящее время техника анализа сигналов в основном ориентирована на измерение энергетических, например, амплитудных, или частотно-временных параметров. В то же время такое важное свойство, как форма сигналов, не измеряется, а лишь идентифицируется в рамках номинальной шкалы, определяющей принадлежность объектов эталону по принципу «похож – непохож», «равен – неравен» [1]. Очевидный недостаток номинальной шкалы связан с невозможностью интерполяции положения объекта в интервале [0..1], из-за отсутствия знаний об упорядоченности проявлений свойства «форма» для однородных объектов, каковыми, например, являются сигналы. Установление подобной закономерности могло бы иметь как познавательный, так и прикладной эффект. Познавательный эффект связан с решением проблемы измеримости свойств объектов и процессов, для которых нет законодательно установленных эталонов. Прикладное значение обусловлено возможностью создания нового типа средств измерений, позволяющих автоматически получать ранее недоступную для пользователя информацию.

Необходимость создания инструментария (методов, средств, технологий) измерения формы сигналов и их характеристик диктуется следующими обстоятельствами. Во-первых, наиболее полная информация о сигнале (или об объекте, который этот сигнал представляет) заключена в форме его распределения. Во-вторых, в настоящее время в технике измерений отсутствуют методы, которые позволяли бы непосредственно оперировать с формой сигнала, как с некоторой «величиной». В контексте данной статьи понятие «сигнал» отождествляется с понятием «реализация сигнала», как сигнала, наблюдаемого на конечном интервале времени. В-третьих, совместное измерение формы сигналов и их частотно-временных и амплитудных параметров позволило бы перейти к проектированию комплексных средств анализа, учитывающих внутреннюю связь энергетических и структурных свойств сигналов.

В работах [2, 3] вводится понятие *идентификационных измерений*, как измерений формы сигналов, основанных на преобразовании сигнала в особое число, названное идентификационным. Подобные числа характеризуют форму сигналов или их характеристик, что подтверждается разработанными идентификационными методами, описанными, например, в работах [4–6]. Определение диапазона изменения того или иного идентификационного числа [7] дает возможность проводить операции над этими числами (по определенным законам), а значит, и над формами.

Например, сложение случайных сигналов с различными формами законов распределений [8, 9], их умножение [10, 11], многократное сложение [12] и т.д.

Идея предлагаемого идентификационного способа измерения параметров сигналов основана на понятии «вариабельность», которое определяется как отношение среднего модуля приращений сигнала к среднему модулю самого сигнала  $U(t)$ :

$$V = \frac{|\Delta U(t)|}{|U(t)|}. \quad (1)$$

Уравнение (1) получено в [13] путем «обратного» решения итерационного уравнения, описывающего особенности фрактального процесса изменения численности популяции (процесса Ферхюльста [14]).

Поясним физический смысл этого понятия применительно к теории сигналов на следующем примере. Пусть имеется гармонический сигнал вида:  $U(t) = U_m \sin \omega t$ , где  $U_m$  — амплитуда,  $\omega$  — круговая частота. Определив величины, входящие в (1), получим:

$$V = \frac{|\Delta U(t)|}{|U(t)|} = \omega \alpha F = 2\pi F, \quad (2)$$

где  $F$  — частота сигнала, измеряемая в герцах, Гц;  $\alpha$  — некоторый коэффициент, имеющий размерность фазы и равный  $2\pi$  радиан для синусоидального сигнала. Следовательно, физический смысл вариабельности состоит в том, что она описывает угловую скорость вращения вектора сигнала  $U(t)$ .

Введем обобщение, заключающееся в предположении, что вариабельность  $V$  сигнала является комплексным параметром, интегрирующим в себе информацию как о форме (по значению  $\alpha$ ), так и о частоте (по значению  $F$ ) сигнала. Другими словами, два разных по форме сигнала одинаковой частоты  $F$  должны иметь различные значения параметра формы (коэффициент  $\alpha$ ) и, соответственно, разную вариабельность.

Следовательно, задача измерения формы и частоты сигнала сводится к тому, чтобы сначала получить информацию о величине  $V$ , например, путем физических измерений, а информацию о величинах  $\alpha$  и  $F$  разделить — путем применения вычислительных процедур. Информация об энергетике сигнала получается естественным образом, поскольку средневыпрямленное значение  $|U(t)|$  сигнала входит в качестве знаменателя определения (1).



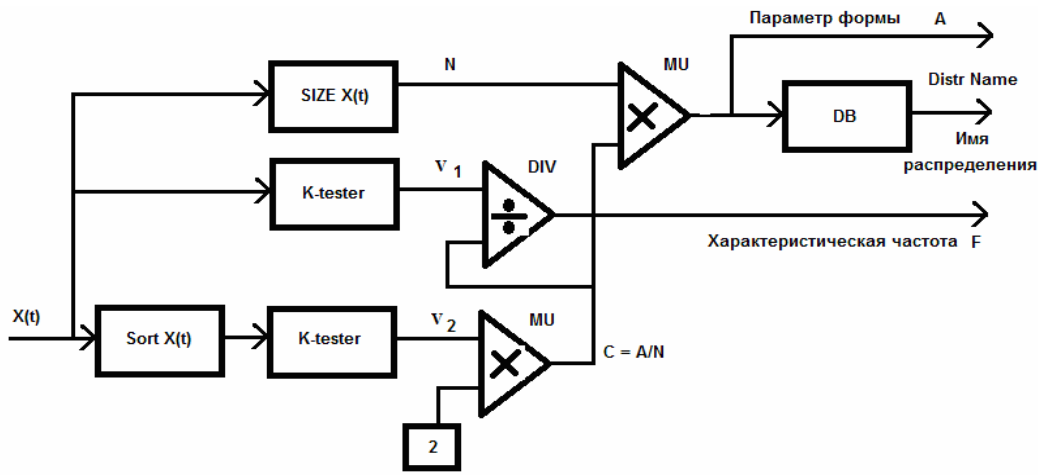


Рис. 1. Структурная схема измерителя параметров сигналов

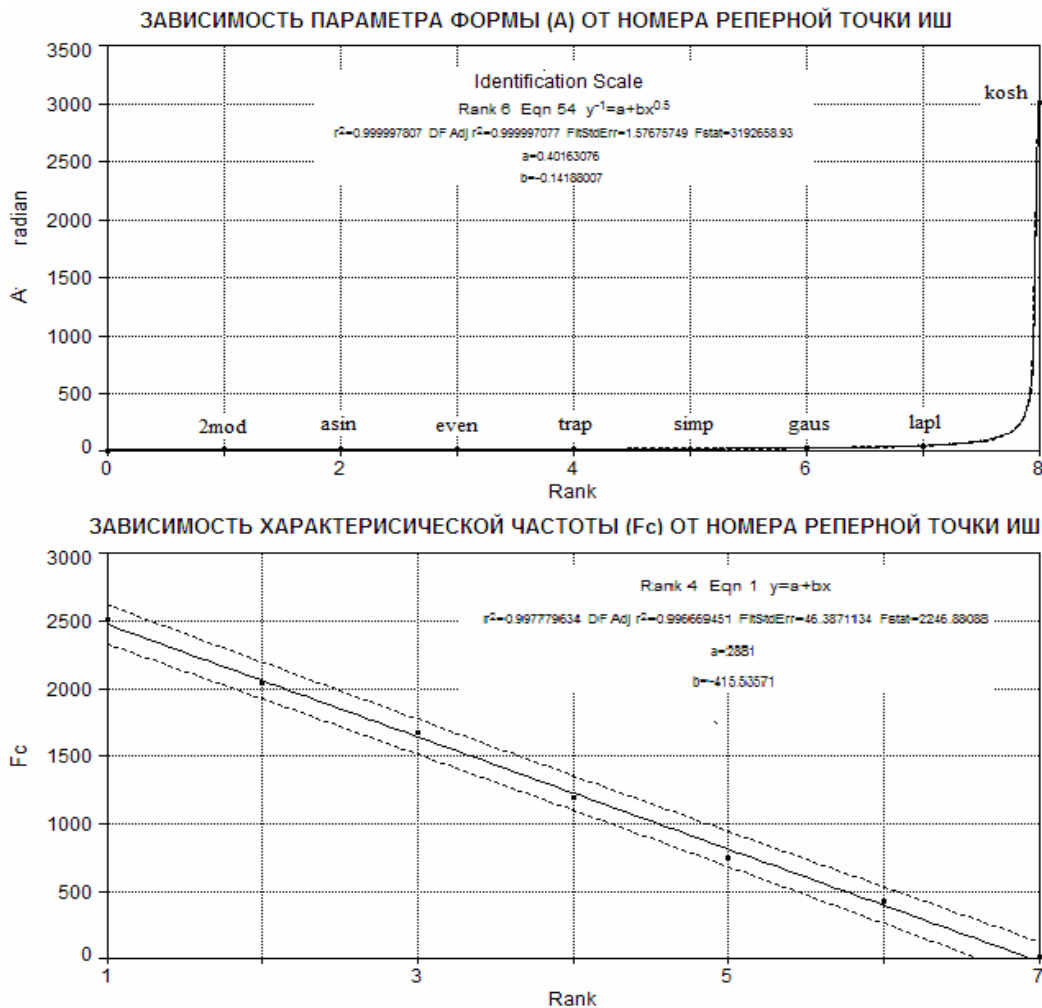


Рис. 2. Зависимости параметра формы (A) и характеристической частоты (Fc) от порядковых номеров распределений случайных сигналов, приведенных в табл. 1

**Методика и инструменты моделирования.** Для проверки вышеуказанных предположений, авторами была разработана (в среде LabVIEW) модель виртуального прибора (ВП), реализующего алгоритм (2) измерения. Структурная схема данной модели (рис. 1) состоит из двух *K-тестеров* [15], модуля измерения *Size* объема выборки *N*, модуля сортировки *Sort* исходного массива сигнала  $U(t)$ , и блоков умножения и деления, с помощью которых осуществляется разделение переменных ( $a$  и  $F$ ) и формирование вы-

ходных параметров: формы ( $A$ ), частоты ( $F$ ) и амплитуды.

На выходе верхнего по схеме *K-тестера* формируется значение вариабельности  $V_1 = AF/N$ , пропорциональное частоте  $F$ , параметру формы  $A$  и обратно пропорциональное объему  $N$  выборки сигнала. Значение вариабельности  $V_2 = A/2N$  на выходе второго *K-тестера* от частоты  $F$  не зависит, так как на вход этого тестера поступает ранжированная (например, по возрастанию), «выпрямленная» функ-

Таблица 1  
Идентификационная шкала параметров формы и вариабельности для случайных сигналов

N = 10000, L = 100	Вид распределения случайного сигнала							
	2mod	asin	even	trap	simp	gaus	lapl	kosh
Rank	1	2	3	4	5	6	7	8
V, рад/с	1	1,27	1,33	1,39	1,4	1,41	1,5	1,87
A, рад	4	6,28	8	10	12	19	36	3000
$F_c$ , Гц	2500	2027	1667	1350	1180	736	416	6
Аналоги	squ	sin, cos	tri, saw					

Примечание: N — объем выборки сигнала, L — количество реализаций сигнала.

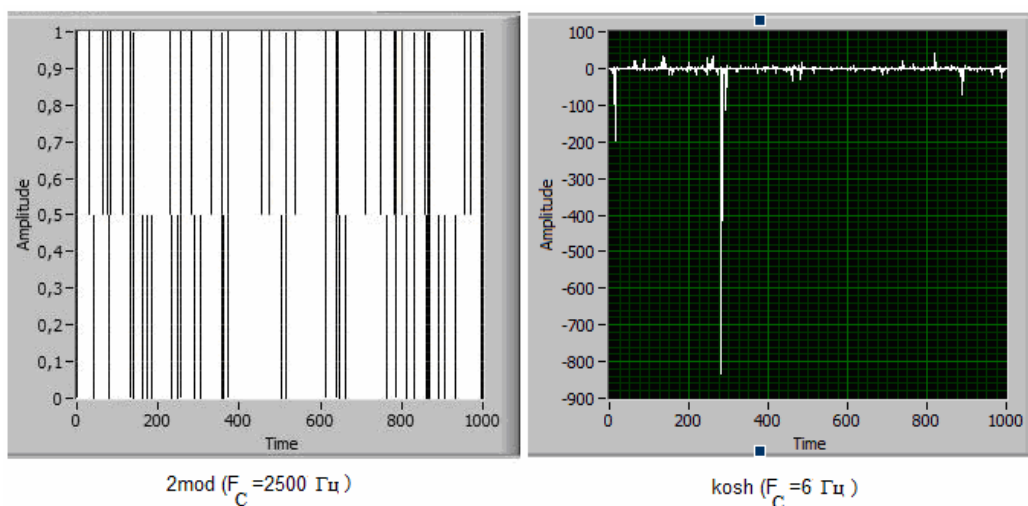


Рис. 3. Графики временных функций реализаций случайных сигналов с двумодальным (2mod) и Коши (kosh) распределениями

ция сигнала с выхода блока сортировки *Sort*. Оценка

измеренного значения частоты  $F = \frac{V_1}{2V_2}$  поступает на выход  $F$ . Оценка значения  $\alpha = 2V_2N = A$ , представляющая форму сигнала, формируется на выходе  $A$ .

Программа исследований модели ВП (рис. 1) для случайных сигналов включала изучение зависимостей параметров  $V$ ,  $A$  и  $F$  от формы распределения (2mod — двумодальное, asin — арксинусное, even — равномерное, trap — трапецидальное, simp — треугольное, gaus — нормальное, lapl — двустороннее экспоненциальное, kosh — Коши). Соответствующие результаты, названные идентификационной шкалой (ИШ), представлены в табл. 1 и отражены на графиках рис. 2. В графе «Аналоги» (табл. 1) помещен список имен периодических сигналов (squ, sin, tri), которые по параметру формы ( $A$ ) эквивалентны случайным сигналам с 2mod, asin и even распределениями.

Аналитические зависимости (рис. 2) получены из данных табл. 1 с помощью программы *TCWin* (фирмы *Jandel Scientific*) путем подбора моделей из внутренней базы по критерию минимума среднеквадратического отклонения. Эффективность подбора моделей зависит, во-первых, от ранга модели. При этом чем меньше ранг, тем меньше погрешность подбора и тем выше эффективность. Во-вторых, учитывается сложность аналитической модели, которая влияет на аппаратно-программную реализацию алгоритма измерения. В случае, когда две модели имеют сопоставимые погрешности подбора, предпочтение следует отдавать более простой из них.

Аналитическое представление позволяет проводить интерполяцию положения исследуемого сигнала между оцифрованными (реперными) точками ИШ [16, 17]. Для обозначения реперных точек ИШ был использован словарь имен распределений случайных сигналов, поскольку он существенно «богаче» соответствующего словаря имен периодических сигналов.

**Результаты моделирования.** Интерпретация полученных результатов заключается в следующем. Во-первых, графики (рис. 2) указывают на то, что случайные сигналы в отношении формы их распределений не являются независимыми, а связаны между собой функционально, как на уровне параметра формы ( $A$ ), так и на уровне частоты ( $F_c$ ).

Во-вторых, физический смысл частоты  $F_c$  для случайных сигналов состоит в том, что она характеризует число появления экстремальных значений сигнала за время наблюдения. Это хорошо видно на графиках (рис. 3) временных функций реализаций случайных сигналов с 2mod и kosh распределениями, имеющими соответственно  $F_c = 2500$  Гц и  $F_c = 6$  Гц. Такую частоту в дальнейшем будем называть *характеристической частотой* и обозначать  $F_c$ .

В-третьих, свойство (точнее, одно из его проявлений), обозначаемое как «форма сигнала», может быть количественно оценено в единицах фазы (радианах или градусах) и логически сопоставлено с системой эталонов, в качестве которых выступают симметричные распределения случайных сигналов (табл. 1). В частности, для пользователя подобные измерения могут выглядеть как измерения с помощью аналогового прибора, оцифрованные отметки

Измеримые свойства сигналов

Таблица 2

№ п/п	Свойства	Измеряемые величины		Модель измерения
		Название	Обозначение	
1	Вариационные	Угловая скорость вращения вектора сигнала $U(t)$ — вариабельность	$\omega$ , рад/с	$\omega = \frac{ \Delta U(t) }{ U(t) }$
2	Энергетические	Средневыпрямленное значение сигнала $U(t)$	$ \overline{U(t)} $ , В	$ \overline{U(t)}  = \frac{ \Delta U(t) }{\omega}$
3	Структурные	Форма распределения сигнала $U(t)$	$\alpha$ , радианы	$\alpha = \frac{\omega}{F_c}$
		Характеристическая частота сигнала $U(t)$	$F_c$ , Гц	$F_c = \frac{\omega}{\alpha}$

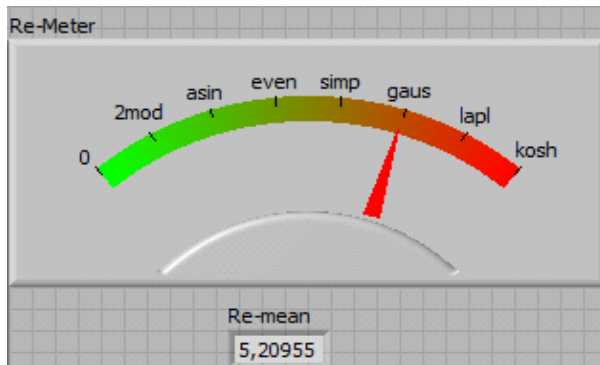


Рис. 4. Аналоговая шкала измерителя формы сигналов

которого в единицах параметра формы ( $A$ ) дополнительно поименованы в терминах распределений (рис. 4).

В цифровом окне ( $Re-mean = 5,20955$ ) данного примера представлен результат измерения некоторого неизвестного сигнала, форма которого приблизительно на 79 % принадлежит отметке с именем *gaus* (отметка с номером 5) и на 21 % — отметке с именем *lapl* (отметка с номером 6). Таким образом, использование идентификационной шкалы (табл. 1) распределений позволяет интерполировать положение исследуемого сигнала в системе принятых эталонов.

В-четвертых, использование *K-тестера* в структуре виртуального прибора позволяет получить информацию не только о форме и частоте исследуемого сигнала, но и о его амплитуде в виде средневыпрямленного значения. Следовательно, на основе рассмотренного способа можно решить еще одну важную прикладную задачу — задачу комплексной оценки всех основных свойств сигналов — вариационных, энергетических и структурных (табл. 2).

При этом непосредственно можно измерять (с помощью АЦП) лишь мгновенные значения отсчетов входного сигнала. Остальные величины оцениваются путем вычислений, например, с помощью встроенного в измерительный прибор микропроцессора.

Особенности измерения периодических сигналов прямоугольной (*squ*), синусоидальной (*sin*), треугольной (*tri*) и пилообразной (*saw*) формы связаны с частотной характеристикой параметра формы ( $A$ ), которая в определенных пределах от частоты не зависит.

Характеристическая частота  $F_c$  для периодических сигналов совпадает с их частотой. Но, в отличие

от характеристической частоты  $F_c$  случайных сигналов, не несет информации о форме распределения. По результатам измерения формы можно установить идентификационную эквивалентность периодических и случайных сигналов: *squ*®*2mod*, *sin*®*asin*, (*tri = saw*)®*even*.

В тех случаях, когда необходимо разделить указанные периодические сигналы от случайных, можно использовать условие: «ЕСЛИ  $\{A \in R \text{ и } R^3\}$  ТО  $\{U(t) \text{® Периодический сигнал}\}$  ИНАЧЕ  $\{U(t) \text{® Случайный сигнал}\}$ ». Здесь символом  $R$  обозначена величина, характеризующая разрешение и определяющая количество отсчетов, приходящееся на один период характеристической частоты сигнала:  $R = N/F_c$ . Фактически данное условие постулирует правило: «Чем сложнее форма сигнала, тем большее количество отсчетов необходимо иметь на одном периоде характеристической частоты». Это правило приводит к такой формулировке теоремы о дискретизации, которая учитывает форму сигнала. Например, чтобы правильно восстановить сигналы прямоугольной, синусоидальной, треугольной и пилообразной формы с помощью полинома первой степени, частоту дискретизации следует выбирать в 6–8 раз больше, чем максимальная частота в спектре сигнала.

Логическая схема, поясняющая применение предлагаемого идентификационного способа измерения параметров сигналов, представлена на рис. 5.

Первичным источником информации служит выборочная реализация  $X(t)$  объемом  $N$ . В модуле 1 происходит измерение параметра вариабельности в соответствие со схемой рис. 1. В модуле 2 вычисляются параметр формы ( $A$ ) и характеристическая частота ( $F_c$ ), которые позволяют интерполировать по идентификационной шкале (табл. 1) лингвистический компонент модели — имя сигнала или его распределения (в данном примере имя сигнала «*SIN*»). В модуле 3 параметр формы используется для вычисления амплитуды сигнала  $X_m$ . Модули 5 и 6 решают классификационные задачи [18–20] определения степеней регулярности/хаотичности и симметрии/асимметрии. Особенности построения классификационных модулей являются предметом рассмотрения других статей [21–23].

**Заключение.** Рассмотренная модель является универсальной в том смысле, что позволяет единым образом описывать во временной области как периодические, так и случайные сигналы, а также всевозможные их композиции.

Перспектива использования рассмотренных инструментов связана с возможностью измерения

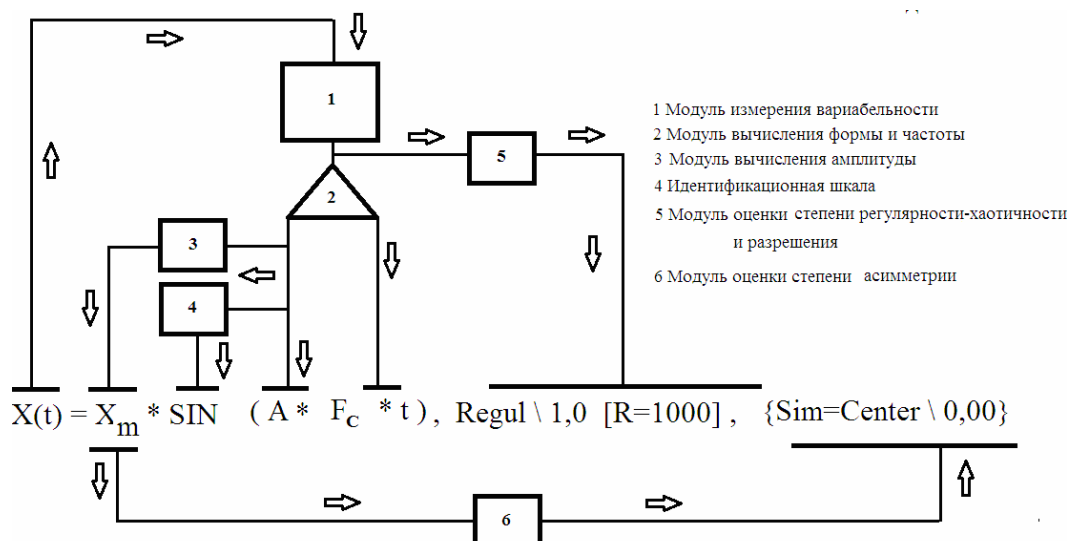


Рис. 5. Алгоритм формирования и структура записи модели синусоидального сигнала

формы распределения любых массивов значений, например, спектров или корреляционных функций. Поскольку предлагаемый способ количественно оценивает качественные состояния объектов или процессов, то его целесообразно использовать для решения интеллектуальных задач управления, измерения, медицинской и технической диагностики.

#### Библиографический список

1. Пиотровский, Я. Теория измерений для инженеров / Я. Пиотровский ; пер. с польск. — М. : Мир, 1989. — 335 с.
2. Кликушин, Ю. Н. Основы идентификационных измерений / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Деп. в ВИНТИ, № 1540-B2006, Омский гос. техн. ун-т. — Омск, 2006.-18 с.
3. Кликушин, Ю. Н. Основы идентификационных измерений [Электронный ресурс] / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Журнал радиоэлектроники. — М. : Изд-во ИРЭ РАН. — 2006. — № 11. — Режим доступа: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).
4. Кобенко, В. Ю. Фрактальная идентификационная шкала / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2009. — № 3 (83). — С. 205–213.
5. Кобенко, В. Ю. Фрактальная идентификационная плоскость V<sub>z</sub>-метода / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2010. — № 1 (87). — С. 213–223.
6. Кобенко, В. Ю. Идентификационные измерения: методы, модели, технологии : моногр. / В. Ю. Кобенко. — Омск : ОмГТУ, 2014. — 208 с.
7. Кобенко, В. Ю. Определение диапазона идентификационной шкалы форм распределений / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2013. — № 3 (123). — С. 235–240.
8. Кобенко, В. Ю. Операция сложения распределений сигналов в пространстве идентификационных чисел [Электронный ресурс] / В. Ю. Кобенко // Журнал радиоэлектроники. — М. : Изд-во ИРЭ РАН. — 2012. — № 4. — Режим доступа: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).
9. Кобенко, В. Ю. Моделирование операции идентификационного сложения распределений случайных сигналов / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2012. — № 2 (110). — С. 304–309.
10. Кобенко, В. Ю. Операция умножения распределений случайных сигналов в пространстве идентификационных чисел [Электронный ресурс] / В. Ю. Кобенко // Журнал радиоэлектроники. — М. : Изд-во ИРЭ РАН. — 2012. — № 3. — Режим доступа: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).
11. Кобенко, В. Ю. Моделирование операции идентификационного умножения распределений случайных сигналов / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2012. — № 3 (113). — С. 302–305.
12. Кобенко, В. Ю. Операция умножения распределения случайного сигнала на число в пространстве идентификационных чисел / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2013. — № 1 (117). — С. 243–247.
13. Кликушин, Ю. Н. Модель роста популяции в задаче автоматической классификации сигналов / Ю. Н. Кликушин, К. Т. Кошеков // Омский научный вестник — 2005. — № 4 (33). — С. 160–163.
14. Пайтген, Х.-О. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / Х.-О. Пайтген, П. Х. Рихтер ; пер. с англ. — М. : Мир, 1993. — 176 с.
15. Кликушин, Ю. Н. Идентификационные инструменты анализа и синтеза формы сигналов : моногр. / Ю. Н. Кликушин. — Омск : ОмГТУ, 2010. — 216 с.
16. Кликушин, Ю. Н. Способ идентификационной интерполяции распределений / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2013. — № 1 (117). — С. 212–215.
17. Кликушин, Ю. Н. Аналитическая интерполяция распределений в пространстве идентификационных шкал / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2013. — № 3. — С. 19–22.
18. Захаренко, В. А. Технология классификации объектов диагностики с помощью МТШ-90 / В. А. Захаренко, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко, С. А. Орлов // Контроль. Диагностика. — 2012. — № 7 — С. 43–49.
19. Кликушин, Ю. Н. Идентификационный способ классификации сигналов / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. — 2013. — № 2 (120). — С. 267–272.
20. Губарев, В. В. Классификационные измерения: методы и реализация / В. В. Губарев, А. А. Горшенков, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Автометрия. — 2013. — № 2. — С. 76–84.
21. Кобенко, В. Ю. Влияние масштабного параметра множества на фрактальную клеточную размерность / В. Ю. Кобенко, С. З. Ихлазов // Деп. в ВИНТИ, № 132-B2011, Омский гос. техн. ун-т. — Омск, 2011. — 8 с.
22. Кобенко, В. Ю. Определение качества поверхности бумаги методом фрактального анализа / В. Ю. Кобенко, С. З. Ихлазов, А. В. Голунов // Омский научный вестник. — 2011. — № 3 (103). — С. 330–334.
23. Кликушин, Ю. Н. Способ компьютерной диагностики болезни Паркинсона [Электронный ресурс] / Ю. Н. Клику-

шин, В. Ю. Кобенко // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 10. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).

**КЛИКУШИН Юрий Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Технология электронной аппаратуры».  
Адрес для переписки: [iit@omgtu.ru](mailto:iit@omgtu.ru)

**КОБЕНКО Вадим Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».

Адрес для переписки: [kobra\\_vad@rambler.ru](mailto:kobra_vad@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 17.06.2014 г.

© В. Ю. Кобенко, Ю. Н. Кликушин

УДК 621.3.049.77

**М. Е. ОСИНКИНА**

ОАО «Омский НИИ  
приборостроения»

## ПРИМЕНЕНИЕ SADT-ТЕХНОЛОГИИ В КОРПУСИРОВАНИИ ИС

**В данной статье рассмотрен современный подход к вопросу корпусирования БИС и СБИС. Проанализированы особенности корпусирования ИС с учетом типа корпуса и его влияния при технологии распайки проволочным монтажом. Предлагается метод корпусирования БИС и СБИС, базирующийся на принципах SADT-методологии.**

**Ключевые слова:** БИС, СБИС, корпусирование, ИС, SADT-методология, структурный анализ, ЭМ поля, тепловые режимы.

Быстрый прогресс в микроэлектронике, такой как постоянно растущая степень интеграции электронных схем и увеличение быстродействия, приводит к тому, что кристалл содержит все больше и больше элементов, что, в свою очередь, приводит к росту энергопотребления кристалла и увеличению количества периферийных элементов, но периферийный элемент кристалла имеет ограниченную нагрузочную способность.

Тенденцией является растущая из года в год доля сигнальных контактов в периферии СБИС, и вследствие этого корпус превращается в сложный электронный прибор. Так же стремительно растет размер периферии кристалла и, следовательно, значительно усложняется задача корпусирования ИС. Ручное корпусирование становится сложным или невозможным для БИС и СБИС.

Для БИС и СБИС все менее приемлемым становится подход, когда вначале проектируется кристалл,

а затем выполняется поиск корпуса, пригодного для корпусирования. Как правило, корпус налагает определенные и часто существенные ограничения на распределение специальных сигналов по периферии кристалла. Существуют оценки [1], что если при выполнении физического проектирования кристалла не учитывать ограничения, налагаемые корпусом на его периферию, то реализация данных ограничений на поздних этапах с помощью трассировки может приводить к увеличению объема кристалла до 15% и более. Это особенно актуально для БИС и СБИС.

Таким образом, актуальной становится разработка маршрута корпусирования ИС. Задача особенно актуальна для случая, когда выполняется корпусирование в готовый корпус в технологии проводного монтажа.

Для эффективного корпусирования БИС и СБИС, где будут учтены все факторы влияния и требования к технологии проводного монтажа, целесообразно рассмотреть методологию SADT.

Таблица 1

Этапы корпусирования ИС

№	Название этапа	Содержание этапа
1	Анализ	На каждый кристалл выдается свое частное техническое задание для корпусирования, связанное с его функциональным назначением.
2	Корпусирование	На этапе корпусирования подбирается вид корпуса, в зависимости от количества развариваемых ножек и типа монтажа. Если тип монтажа проволочный (wire bond), то подбирается материал проволоки и форма профиля. Так же подбирается материал корпуса в зависимости от назначения будущей микросхемы.
3	Моделирование	После корпусирования необходимо промоделировать данную конструкцию по ЭМС и тепловым режимам, для того чтобы исключить все неточности конструкции и создать надежную микросхему для разных условий эксплуатации.
3	Реализация	После успешного моделирования на этапе реализации создается КД, где вносятся все необходимые требования по корпусированию.
4	Тестирование	При получении готовой микросхемы необходимо проверить и протестировать ее в разных условиях эксплуатации, в которых она должна функционировать.
5	Установка	Транспортировка и установка микросхемы на печатную плату.
6	Функционирование	Стабильная работа микросхемы в печатной плате на основном объекте на протяжении нескольких лет.

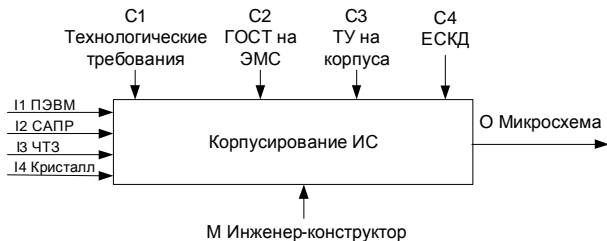


Рис. 1. Диаграмма верхнего уровня корпусирования ИС



Рис. 2. Обобщение списка функций

SADT (аббревиатура выражения Structured Analysis and Design Technique — методология структурного анализа и проектирования) — это методология, разработанная специально для того, чтобы облегчить описание и понимание искусственных систем, попадающих в разряд средней сложности. SADT была создана и опробована на практике в период с 1969 по 1973 г. [2].

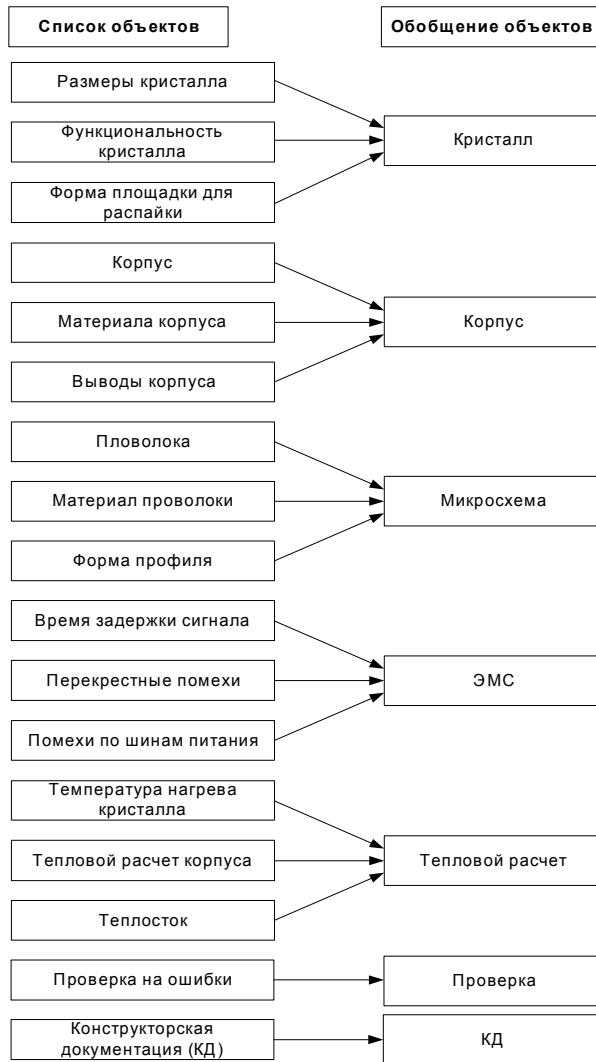


Рис. 3. Обобщение списка объектов



Рис. 4. Установление соответствия между обобщенными объектами и функциями

Эта методология возникла под сильным влиянием PLEX, концепции клеточной модели человека — ориентированных функций Хори, общей теории систем технологии программирования и даже

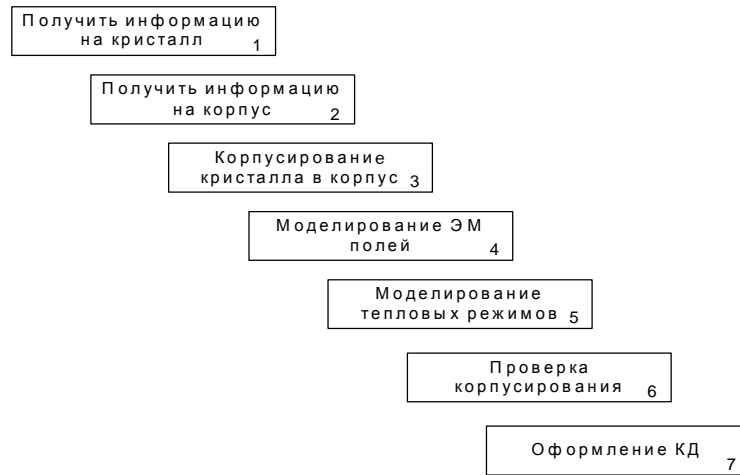


Рис. 5. Последовательность блоков, содержащих выявленные функции системы

кибернетики. С 1973 г. сфера ее использования существенно расширяется для решения задач, связанных с большими системами, такими как проектирование телефонных коммуникаций реального времени, автоматизация производства (САМ), создание программного обеспечения для командных и управляющих систем, поддержка боеготовности. Она с успехом применялась для описания большого количества сложных искусственных систем из широкого спектра областей (банковское дело, очистка нефти, планирование промышленного производства, системы наведения ракет, организация материально-технического снабжения, методология планирования, технология программирования). Причина такого успеха заключается в том, что SADT является полной методологией для создания описания систем, основанной на концепциях системного моделирования [2].

Основная цель использования методологии состоит в четком структурировании деятельности с помощью блоков системы, разделение функций между блоками, определение входных, выходных и управляющих данных для каждого блока.

SADT-технология является одной из современных передовых технологий, служащих описанию работы систем средней сложности. Рассмотрим применение такой технологии для эффективного проектирования и корпусирования ИС.

Процесс корпусирования ИС имеет несколько этапов, основные из них приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что за первые четыре этапа отвечает инженер-конструктор по корпусированию ИС. Для избежания ошибок и недочетов в разработках инженера-конструктора следует в его деятельности выделить несколько этапов.

**1-й этап** направлен на определение объекта конструкторской деятельности. В конструкторской работе объектом является готовая микросхема, но так как ее создают в процессе работы, то конструктор начинает свою деятельность с изучения документации. Документация включает частное техническое задание от инженера-схемотехника для корпусирования, связанное с функциональным назначением кристалла. В ЧТЗ содержатся конкретные требования по определенным цепям, будь это цепи питания или сигнальные цепи с указанными ограничениями. Также инженер конструктор находит и изучает информацию на готовые корпуса разных фирм и стандартные профили при корпусировании проволочным монтажом.

**2-й этап** служит формулированию цели разрабатываемой модели. На данном этапе задают вопросы, ответы на которые необходимы для корпусирования ИС.

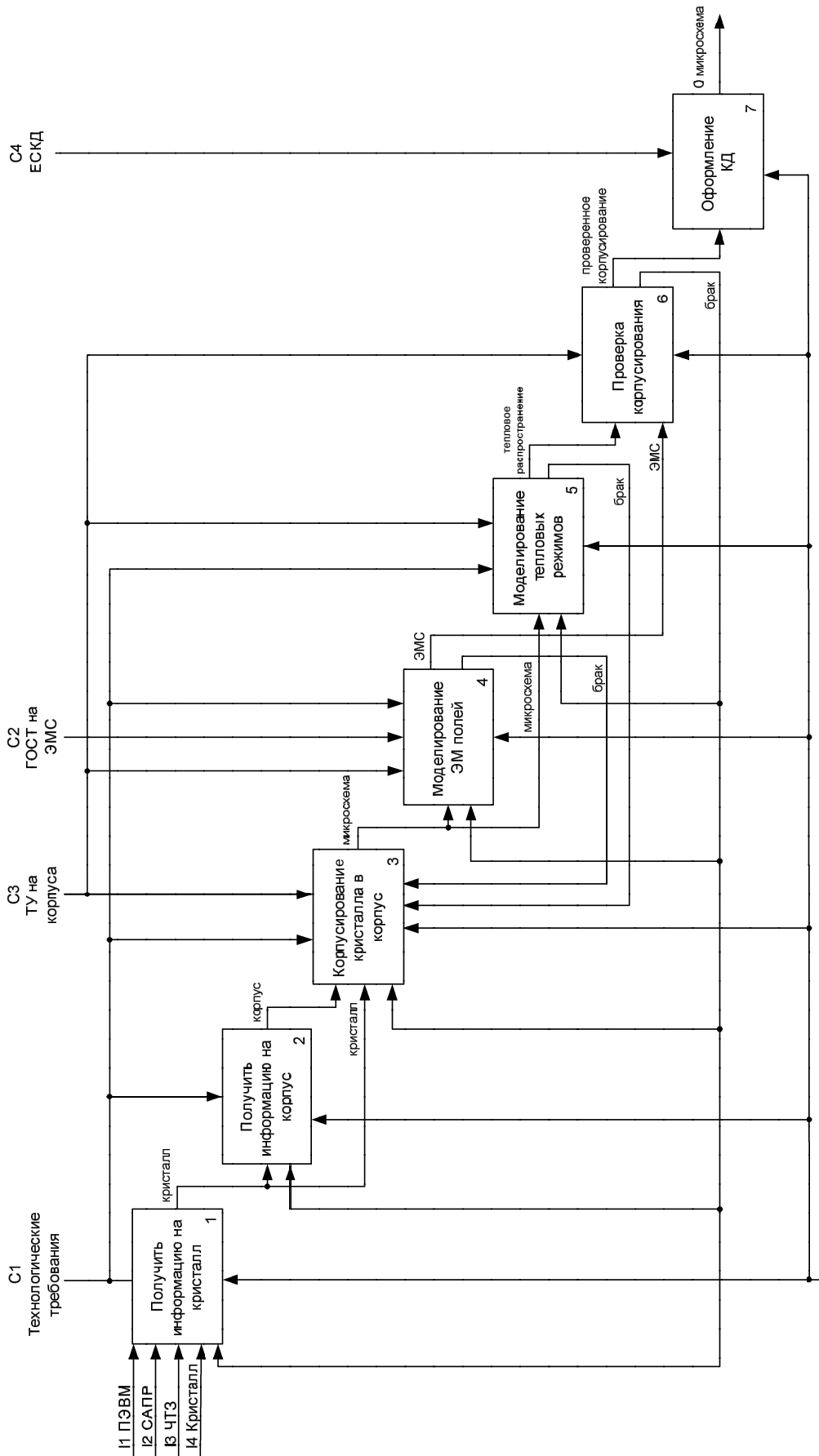
1. Габаритные размеры кристалла?
2. Функциональность кристалла?
3. Количество контактов для разварки?
4. Тип монтажа кристалла?
5. Вид корпуса для разварки?
6. Материал корпуса для разварки?
7. Материал и толщина проволоки при корпусировании?
8. Форма профиля проволоки для разварки?
9. Время быстройдействия ИС?
10. Температура нагрева кристалла во время работы?

В процессе корпусирования ИС могут возникать дополнительные вопросы, решение которых необходимо для проработки. В целом, по ответам на вышеперечисленные вопросы можно сформировать «каркас» микросхемы с предъявляемыми требованиями к ее конструкции.

**3-й этап** заключается в составлении формулировки цели модели, чему способствуют поставленные на втором этапе вопросы. Цель инженера конструктора заключается в создании готовой микросхемы с учетом предъявляемых требований разработчика, а также физических требований на микросхему по теплу, ЭМС, вибрации.

**4-й этап** направлен на выявление ограничений, накладываемых разработчиком, при корпусировании ИС. Ограничения зависят от функциональности микросхемы и назначения. Многие микросхемы делаются для общего потребителя, которые устанавливаются в бытовую технику. На данные микросхемы требования по условиям эксплуатации и срокам хранения достаточно лояльны. Микросхемы для бытового применения изготавливаются в основном из пластиковых корпусов и в крупносерийном производстве для их удешевления. Так же изготавливаются микросхемы для военного назначения, где условия эксплуатации очень жесткие, учитываются максимальные температуры, вибропрочность, требования экранирования от электромагнитного излучения, а в микросхемах для космического применения включаются требования радиационной стойкости.

На **5-м этапе** представляется возможным построение SADT-диаграммы верхнего уровня (рис. 1). Диаграмма представляет четырехугольник, к каждой



М Инженер-конструктор

Рис. 6. Диаграмма второго уровня корпусирования ИС



стороне которого подходят дуги в виде направленных отрезков прямых. Дуги имеют обозначения: вход (input) обозначают начальной буквой — I, управление (control) — C, выход (output) — O, механизм (mechanism) — M. Если имеется несколько дуг, подходящих к стороне прямоугольника, то обозначения сопровождаются цифрами.

Входом диаграммы для описания системы «корпусирование ИС» является мощный персональный компьютер (I1), необходимые программные продукты для работы инженера-конструктора по корпусированию ИС (I2), частное техническое задание для инженера-конструктора (I3), информация по кристаллу (I4). Управлением при корпусировании ИС служат технологические требования (C1), ГОСТ на ЭМС (C2), технические условия на корпуса (C3), единая система конструкторской документации (ЕСКД) (C4). Выходом является готовая микросхема.

**6-й этап** направлен на составление подробных списков объектов, входящих в систему, и функций, которые система должна выполнять.

Составим список объектов и список функций для корпусирования ИС.

На рис. 2 (первый столбик) и на рис. 3 (первый столбик) представлен подробный список объектов и функций, необходимых для корпусирования ИС. Так как микросхемы бывают разные по функциональности, подробный список объектов и функций может меняться в связи с назначением микросхемы. Микросхема может включать в себя как цифровую часть, так и аналоговую часть, поэтому подробный список может быть большим и для дальнейшей работы следует обобщить список объектов и функций. Иными словами, из составленных подробных списков объектов и функций создаем обобщенные списки объектов и функций.

На рис. 2 и рис. 3 приведены обобщенные списки объектов и функций, из которых видно, что количество объектов и функций стало меньше.

**7-й этап** устанавливает соответствие между обобщенными объектами и функциями. Возьмем все обобщенные объекты и сопоставим их по функциональному смыслу с обобщенными функциями (рис. 4).

**8-й этап** объединяет обобщенные функции в блоки, что позволяет построить диаграмму более низкого уровня (второго уровня).

Самым главным и первым из блоков в диаграмме второго уровня является «Получить информацию на кристалл», так как работу следует начинать, зная основные габариты кристалла, расположение площадок для распайки и размеры площадок. Следующим блоком является «Получить информацию на корпус». Нам необходимо знать и основные габариты корпуса, и количество ножек, и зону для установки кристалла, а также из какого материала сделан корпус. Третьим блоком поставлен «Корпусирование кристалла в корпус», и далее идут два блока: четвертым — «Моделирование ЭМ полей», пятым — «Моделирование тепловых режимов». Эти два блока могут меняться местами, а также один из них может отсутствовать. Все зависит от функциональности микросхемы.

После того как определены габариты кристалла и корпуса, идет процесс корпусирования кристалла в корпус, после чего моделируются ЭМ поля и тепловые режимы, для того чтобы выявить и устранить отклонения в работе микросхемы в разных условиях. Далее следует проверка корпусирования и создание на нее КД.

На рис. 5 показана установленная последовательность блоков. Самым первым и важным блоком является получение информации на кристалл для последующего корпусирования, без которой невозможно подобрать корпус и проектировать последующие блоки. После чего устанавливается последовательность оставшихся блоков по их функциональной важности. Блоки «Моделирование ЭМ полей» и «Моделирование тепловых режимов» могут меняться в системе, в зависимости от назначения микросхемы и ее рабочих условий.

**9-й этап** служит выявлению последовательности связей, нахождению управления, механизма исполнения необходимых ресурсов для функционирования диаграммы. Инженер-конструктор проектирует установку кристалла в корпус с разваркой сигнальных выводов по периферии микросхемы, ограничением и управлением являются технические требования, ТУ на корпус, ГОСТы на ЭМС, ЕСКД. Входом в каждый блок является, как правило, выход из предыдущего блока.

На рис. 6 показана диаграмма более низкого второго уровня, выражающая последовательность действий инженера-конструктора.

Таким образом, благодаря SADT-технологии корпусирование кристалла в корпус разделяют на последовательные этапы. На данный момент существует очень много разновидностей корпусов, начиная от их конструкции (DIP, SOIC, QFN, BGA) и заканчивая их материалами (металлокерамические, керамические, пластиковые корпуса). Современные корпуса микросхем, такие как микроBGA, отвечают высокому классу точности и характеризуются многослойной топологией подложки микросхемы, в которой идет разделение аналоговых и цифровых сигналов, вследствие чего следует проводить необходимые расчеты ЭМС. Построенная диаграмма корпусирования ИС на основе SADT-технологии позволяет устанавливать и разваривать кристалл в корпус, учитывая все технические и технологические требования.

#### Библиографический список

1. Kathleen A. Stalter, Raymond A. Jackson, and David C. Linnell. Low-Cost, High Reliability Flip-Chip Removal for Multichip Modules. IBM MicroNews, Fourth Quarter 1999, Volume 5, No. 4.
2. Марка, Д. Методология структурного анализа и проектирования / Д. Марка, К. Мак Гоуэн. — М., 1993. — 240 с.

**ОСИНКИНА Марина Евгеньевна**, ведущий инженер-конструктор.

Адрес для переписки: [marishao@inbox.ru](mailto:marishao@inbox.ru)

Статья поступила в редакцию 27.08.2014 г.

© М. Е. Осинкина