

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 519.718.4

**В.В. Тарасов, В.А. Саблина**

### ТЕЗИС ДЖ. ФОН НЕЙМАНА И СИНТЕЗ НАДЕЖНЫХ СХЕМ ИЗ НЕНАДЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Прослеживается исторический аспект развития теории надежностно-го синтеза управляющих систем от тезиса Дж. фон Неймана о том, что вероятность ошибки схемы из функциональных элементов не может быть ниже вероятности ошибки конечного элемента схемы (Принстонский университет США, 1952 г.), и до настоящего времени – отказа от этого принципа.*

**Ключевые слова:** надежность управляющих систем, синтез надежных схем из ненадежных элементов.

**Введение.** В январе 1952 г. в Калифорнийском технологическом институте Дж. фон Нейманом было прочитано пять лекций, а затем на их основе опубликована статья [1]. Как видно уже из названия статьи, знаменитый автор искал пути к объяснению высокой надежности головного мозга человека, создал математические модели – нейронные сети, автоматы, схемы в базисе из функциональных элементов (органов). Нейман предложил к ненадежному базису из функциональных элементов добавить голосующий элемент от трех переменных  $h_2(x, y, z) = xy \vee xz \vee yz$  (смеситель Неймана). Если взять три экземпляра одинаковых схем, реализующих функцию алгебры логики  $f(x_1, \dots, x_n)$ , подать их значения на входы смесителя (рисунок 1, а), то при условии, что ошибка схем, реализующих  $f(\tilde{x})$ , где  $\tilde{x} = (x_1, \dots, x_n)$ , с вероятностью ошибки  $\varepsilon < 1/2$ , то схема  $S$  будет реализовывать функцию  $f(\tilde{x})$  с ошибкой  $\varepsilon' < \varepsilon$ . Этим примером Нейман указал один из путей сколь угодно надежного синтеза из ненадежных элементов с использованием вполне надежного смесителя. Этим результатом вначале заинтересовались биологи, но не нашли возможным реализовать эти идеи в биологических управляющих системах. Инженерам такие идеи понравились, они стали развивать их на технических управляющих системах, и вскоре были разработаны принципы резервирования и голосования схем из ненадежных элементов. Весь «могучий

поток» авторов работ в области надежностного синтеза опирался на тезис Неймана: вероятность ошибки схемы из функциональных элементов не может быть ниже вероятности ошибки конечного элемента схемы.

Авторы работ [2, 3], следуя Нейману, находили возможность построения схем с ошибкой не большей, чем ошибка конечного элемента. Следуя Нейману, авторы [4, 5, 6] разделяют базис на две части  $A$  и  $B$ , где  $A$  – вполне надежная часть, часть  $B$  дополняет базис ненадежными элементами до полной системы. Замыкание  $A$  есть некоторый класс Поста [7], необходимое содержание которого для построения сколь угодно надежных схем и выясняли авторы. Оказалось, что замыкание  $A$  должно содержать некоторую мажоритарную функцию с голосующими свойствами

$$h_\mu(x_1, \dots, x_{\mu+1}) = \bigvee_{i=1}^{\mu+1} x_1 x_2 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_{\mu+1} \quad (1)$$

или двойственную к ней функцию  $h_\mu^*(x_1, \dots, x_{\mu+1})$ , при  $\mu = 2$  мы имеем  $h_2(x_1, x_2, x_3)$  – смеситель Неймана.

В работе [8] построен базис из одного элемента, вполне надежно выпускающего 0 и 1 на некоторых наборах  $\tilde{\sigma}$  и  $\tilde{\tau}$  соответственно при некоторых регламентациях ненадежности на других входных наборах. Этот базис позволяет строить сколь угодно надежные шэфферовские элементы. На рисунке 1, б элемент

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} x \oplus y, & \text{если } (x, y) \neq (0, 0), \\ \alpha, & \text{Pr}(\alpha = 1) = p, 0 < p < 1, \end{cases}$$

где  $\alpha$  – булева случайная величина.

При  $l \rightarrow \infty$  имеем

$$\text{Pr}\left(\left| M\varphi_l(x, y) - \overline{xy} \right| > 0\right) \rightarrow 0,$$

где  $M$  – оператор математического ожидания.

В работе [8] дается поправка тезиса Неймана на случай базиса с частичной ненадежностью.

В работе [9] показано, что для базиса с частичной ненадежностью можно ослабить требования абсолютной надежности мажоритарных элементов (1). Также в [9] показано, что корректирующими свойствами в разной степени обладают все монотонные функции алгебры логики более чем от одного переменного. Исследование базисов с частично надежными элементами имело продолжение [10] и выполнено практически до конца.

Можно показать, что при некоторых условиях функция  $x \oplus y$  обладает корректирующими свойствами. Например, возьмем базис, состоящий из вполне надежного элемента  $x \oplus y$  и двух вполне ненадежных (ненадежных при всех входных комбинациях) элементов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , описанных в таблице 1, где  $\alpha_i, \beta_i, i = \overline{1, 4}$  – случайные булевы величины.

Таблица 1 – Значения элементов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$

$x, y$	$\varphi_1$	$\varphi_2$
0 0	$\alpha_1$	$\beta_1$
0 1	$\alpha_2$	$\beta_2$
1 0	$\alpha_3$	$\beta_3$
1 1	$\alpha_4$	$\beta_4$

Из работы [6] следует, что система функций  $\{x \oplus y, \varphi_1, \varphi_2\}$  не полна, так как функции базиса входят в класс  $pL_1$   $p$ -линейных функций. Однако предположим, что пара функций  $(\varphi_1, \varphi_2)$  выпускает на выходе пары значений с ограничением согласно таблице 2, что может быть при некоторой зависимости случайных пар  $(\alpha_i, \beta_i)$ . Тогда суперпозиция  $\varphi_1(x, y) \oplus \varphi_2(x, y)$  дает вполне надежный штрих Шеффера.

Таблица 2 – Пары значений функций  $(\varphi_1, \varphi_2)$

$x, y$	$(\varphi_1, \varphi_2)$
0 0	(0 1), (1 0)
0 1	(0 1), (1 0)
1 0	(0 1), (1 0)
1 1	(0 0), (1 1)

Наконец, в работе [11] появился простой пример базиса вполне ненадежного, то есть элементы базиса ненадежно функционируют на всех входных наборах и, тем не менее, базис строит вполне надежный шифферовский элемент:  $\{\psi = xy \oplus \alpha, \varphi = \overline{x} \oplus \alpha\}$  – базис, в котором  $\alpha$  – случайная булева величина. Тогда имеем по рисунку 1, в:

$$\varphi(\psi) = \overline{xy \oplus \alpha \oplus \alpha} = \overline{xy \oplus \alpha \oplus \alpha} = \overline{xy}. \quad (2)$$

К обобщению этого примера мы и переходим.

**Цель работы.** Исследовать возможности развития теории надежности управляющих систем без опоры на тезис Неймана.

**Основная часть.** Функция алгебры логики  $f(x_1, \dots, x_n, z_1, \dots, z_m)$  называется *булевой функцией с вирусами*, если  $z_1, \dots, z_m$  – несобственные переменные функции – индикаторы внешних  $m$  факторов. Эти переменные нельзя переименовывать, отождествлять, не разрешены подстановки других функций, переменные  $x_1, \dots, x_n$  – обычные булевы переменные [11]. Разложив функцию  $f(\tilde{x}, \tilde{z})$  по переменным  $x_1, \dots, x_n$ , имеем

$$f(\tilde{x}, \tilde{z}) = \bigvee_{\sigma} x_1^{\sigma_1} \dots x_n^{\sigma_n} f(\tilde{\sigma}, \tilde{z}) = \bigvee_{\sigma} x_1^{\sigma_1} \dots x_n^{\sigma_n} f_{|\tilde{\sigma}|}(\tilde{z}),$$

где  $f_{|\tilde{\sigma}|}(\tilde{z})$  – проекция вируса на конъюнкцию  $x_1^{\sigma_1} \dots x_n^{\sigma_n}$ ,  $|\tilde{\sigma}|$  – это натуральное число, двоичная запись которого  $\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n$ ,  $|\tilde{\sigma}| = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1$ ,  $x^\sigma = x \oplus \overline{\sigma}$ .

**Пояснение.** В дальнейшем будем учитывать свойство дизъюнктивных сумм попарно ортогональных слагаемых: если  $f_i f_j = 0$  при  $i \neq j$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , то  $f_1 \vee f_2 \vee \dots \vee f_n = f_1 \oplus f_2 \oplus \dots \oplus f_n$ .

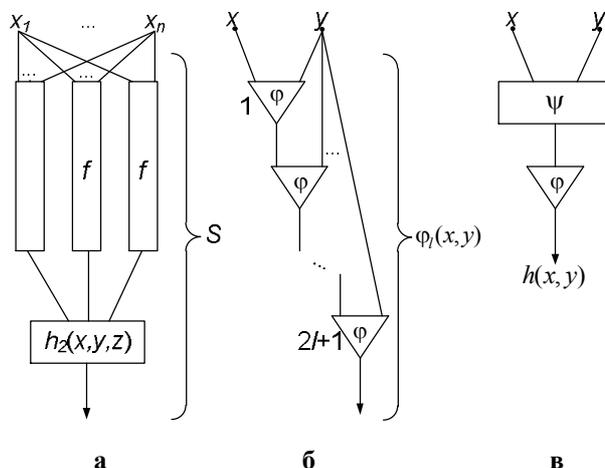


Рисунок 1 – Схемы из функциональных элементов

1. Обобщим ситуацию с примером (2):  
 $\psi(x, y, \tilde{z}) = \bar{x} \bar{y} \psi(0, 0, z) \oplus \bar{x} y \psi(0, 1, \tilde{z}) \oplus$   
 $\oplus x \bar{y} \psi(1, 0, \tilde{z}) \oplus x y \psi(1, 1, \tilde{z}) =$   
 $= \bar{x} \bar{y} \psi_0(\tilde{z}) \oplus \bar{x} y \psi_1(\tilde{z}) \oplus x \bar{y} \psi_2(\tilde{z}) \oplus x y \psi_3(\tilde{z}) =$   
 $= \bar{x} \bar{y} \psi_0 \oplus \bar{x} y \psi_1 \oplus x \bar{y} \psi_2 \oplus x y \psi_3;$   
 $\varphi(x, \tilde{z}) = \bar{x} \varphi_0(\tilde{z}) \oplus x \varphi_1(\tilde{z}) = \bar{x} \varphi_0 \oplus x \varphi_1.$

Из рисунка 1, в имеем  
 $h = \varphi(\psi(x, y, \tilde{z}), \tilde{z}).$  (3)

Разложим (3) по переменным  $x, y$ :  
 $\bar{x} \bar{y} \varphi(\psi_0, \tilde{z}) \oplus \bar{x} y \varphi(\psi_1, \tilde{z}) \oplus$  (4)  
 $\oplus x \bar{y} \varphi(\psi_2, \tilde{z}) \oplus x y \varphi(\psi_3, \tilde{z}).$

Приравнивая функцию, заданную выражением (4), штриху Шеффера, имеем  
 $\varphi(\psi_0, \tilde{z}) = 1 = \varphi(\psi_1, \tilde{z}) = \varphi(\psi_2, \tilde{z}),$  (5)  
 $\varphi(\psi_3, \tilde{z}) = 0.$

Каждую функцию из (5) разлагаем соответственно по переменным  $\psi_i, i = \overline{0, 3}$ :  
 $\bar{\psi}_0 \varphi_0 \oplus \psi_0 \varphi_1 = 1, \bar{\psi}_1 \varphi_0 \oplus \psi_1 \varphi_1 = 1,$  (6)  
 $\bar{\psi}_2 \varphi_0 \oplus \psi_2 \varphi_1 = 1, \bar{\psi}_3 \varphi_0 \oplus \psi_3 \varphi_1 = 0.$

Представим (6) как систему  
 $\begin{cases} \bar{\psi}_i \bar{\varphi}_0 \oplus \psi_i \bar{\varphi}_1 = 0, i = 0, 1, 2, \\ \bar{\psi}_3 \varphi_0 \oplus \psi_3 \varphi_1 = 0. \end{cases}$  (7)

**Пояснение.** Более подробно:  
 $\bar{\psi}_i \varphi_0 \oplus \psi_i \varphi_1 = 1, \bar{\psi}_i \varphi_0 \oplus \psi_i \varphi_1 = \bar{\psi}_i \oplus \psi_i,$   
 $\bar{\psi}_i \varphi_0 \oplus \psi_i \varphi_1 \oplus \bar{\psi}_i \oplus \psi_i = 0,$   
 $(\bar{\psi}_i \varphi_0 \oplus \bar{\psi}_i) \oplus (\psi_i \varphi_1 \oplus \psi_i) = 0,$   
 $\bar{\psi}_i(\varphi_0 \oplus 1) \oplus \psi_i(\varphi_1 \oplus 1) = 0,$   
 $\bar{\psi}_i \bar{\varphi}_0 \oplus \psi_i \bar{\varphi}_1 = 0.$

Оформим (7) как систему  
 $\begin{cases} \bar{\psi}_i \bar{\varphi}_0 = 0, i = 0, 1, 2, \\ \psi_i \bar{\varphi}_1 = 0, i = 0, 1, 2, \\ \bar{\psi}_3 \varphi_0 = 0, \\ \psi_3 \varphi_1 = 0. \end{cases}$  (8)

**Лемма.** Пусть  $f$  и  $g$  – две булевы функции от одного и того же списка переменных. Формулы  $fg = 0, f \leq \bar{g}$  эквивалентны как двухместные предикаты.

Δ Утверждение легко проверить, составляя для каждой формулы таблицу истинности. ▲

По лемме 1 систему (8) можно оформить в систему

$$\begin{cases} \bar{\varphi}_0 \leq \psi_i \leq \varphi_1, i = 0, 1, 2, \\ \varphi_0 \leq \psi_3 \leq \bar{\varphi}_1. \end{cases}$$
 (9)

К непротиворечивости системы (9) следует добавить условия:  $\bar{\varphi}_0 \leq \varphi_1$ , что эквивалентно

условию  $\bar{\varphi}_0 \leq \varphi_1, \varphi_0 \leq \bar{\varphi}_1$ , что эквивалентно условию  $\varphi_0 \varphi_1 = 0$ .

Система условий  $\bar{\varphi}_0 \bar{\varphi}_1 = 0, \varphi_0 \varphi_1 = 0$  эквивалентна одному условию  $\varphi_0 \oplus \varphi_1 = 1$  или, что то же самое,  $\varphi_0 = \bar{\varphi}_1$ . Таким образом, функция  $\varphi(x, \tilde{z})$  может быть записана в виде  $\bar{x} \oplus \varphi_1$ .

Из (9) получаем, что  $\psi_3 = \varphi_0, \psi_i = \bar{\varphi}_0, i = 0, 1, 2$ . Отсюда  
 $\psi(x, y, \tilde{z}) = \bar{\varphi}_0(\bar{x} \bar{y} \oplus \bar{x} y \oplus x \bar{y}) \oplus \varphi_0 xy =$   
 $= \bar{\varphi}_0 \overline{xy} \oplus \varphi_0 xy = xy \oplus \varphi_1,$

то есть мы получили то же решение, что было в работе [11].

2. Таким же образом исследуем композицию  $h$  двух булевых функций  $g(x, y, \tilde{z})$  и  $f(x, y, \tilde{z})$ :  
 $h = g(x, f(x, y, \tilde{z}), \tilde{z}) = \bar{x} \bar{y} g(0, f(0, 0, \tilde{z}), \tilde{z}) \oplus$   
 $\oplus \bar{x} y g(0, f(0, 1, \tilde{z}), \tilde{z}) \oplus x \bar{y} g(1, f(1, 0, \tilde{z}), \tilde{z}) \oplus$   
 $\oplus x y g(1, f(1, 1, \tilde{z}), \tilde{z}).$

Оставим тот же вопрос: при каких условиях реализуется штрих Шеффера  $h = \overline{xy}$ ?

Имеем:  
 $g(0, f_0, \tilde{z}) = g(0, f_1, \tilde{z}) = 1,$  (10)  
 $g(1, f_2, \tilde{z}) = 1, g(0, f_3, \tilde{z}) = 0.$

Уравнения (10) после разложения по  $f_0, f_1, f_2, f_3$  запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \bar{f}_0 g_0 \oplus f_0 g_1 = 1, \bar{f}_1 g_0 \oplus f_1 g_1 = 1, \\ \bar{f}_2 g_2 \oplus f_2 g_3 = 1, \bar{f}_3 g_2 \oplus f_3 g_3 = 0. \end{aligned}$$

Организуем их в виде системы

$$\begin{cases} \bar{f}_0 \bar{g}_0 \oplus f_0 \bar{g}_1 = 0, \\ \bar{f}_1 \bar{g}_0 \oplus f_1 \bar{g}_1 = 0, \\ \bar{f}_2 \bar{g}_2 \oplus f_2 \bar{g}_3 = 0, \\ \bar{f}_3 g_2 \oplus f_3 g_3 = 0 \end{cases}$$

и в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} \bar{g}_0 \leq f_0 \leq g_1, \\ \bar{g}_0 \leq f_1 \leq g_1, \\ \bar{g}_2 \leq f_2 \leq g_3, \\ g_2 \leq f_3 \leq \bar{g}_3. \end{cases}$$
 (11)

К неравенствам (11) для непротиворечивости следует добавить условия

$$\bar{g}_0 \leq g_1, \bar{g}_2 \leq g_3, g_2 \leq \bar{g}_3.$$
 (12)

Последние два неравенства в (12) эквивалентны одному  $\bar{g}_2 = g_3$ . Поэтому из (11) следует, что  $f_2 = f_3 = g_2$ . После упрощения система (11) примет вид:

$$\begin{cases} \bar{g}_0 \leq f_i \leq g_1, i = 0, 1, \\ f_2 = f_3 = g_2 = \bar{g}_3. \end{cases}$$
 (13)

Отсюда можно записать выражения для функций  $g$  и  $f$  :

$$g(x, y, \tilde{z}) = \bar{x} \bar{y} g_0 \oplus \bar{x} y g_1 \oplus x \bar{y} g_2 \oplus x y \bar{g}_2 = \\ = \bar{x} (\bar{y} g_0 \oplus y g_1) \oplus x (y \oplus g_0), \text{ где } \bar{g}_0 \leq g_1, \\ f(x, y, \tilde{z}) = \bar{x} \bar{y} f_0 \oplus \bar{x} y f_1 \oplus (x \bar{y} \oplus x y) f_2 = \\ = \bar{x} (\bar{y} f_0 \oplus y f_1) \oplus x f_2 = \bar{x} (\bar{y} f_0 \oplus y f_1) \oplus x g_2.$$

Из условий (13) можно подсчитать, сколько решений имеет поставленная задача: пусть  $\rho_1 = \rho(\bar{g}_0, g_1)$  – расстояние Хэмминга. Число вариантов выбора пары функций равно  $2^{2\rho_1}$  (ввиду независимости выбора  $f_0, f_1$ ). Число вариантов выбора  $g_2$  равно  $2^{2^m}$  (выбор функций  $f_2, f_3, g_3$  производится автоматически). Отсюда число вариантов решения равно

$$2^{2^m} \sum_{\bar{g}_0 \leq g_1} 2^{2\rho_1}. \quad (14)$$

Пусть  $\rho_2 = \rho(\bar{g}_0, g_1)$  – расстояние Хэмминга,  $|\bar{g}_0|$  – число единиц функции  $\bar{g}_0$ . Число вариантов выбора функции  $\bar{g}_0$  равно  $2^{2^m}$ . Число вариантов выбора функции  $g_1$  равно  $2^{2^m - |\bar{g}_0|}$ .

Тогда формула (14) уточняется как

$$2^{2^m} \sum_{\bar{g}_0} 4^{\rho_1} 2^{2^m - |\bar{g}_0|} = \sum_{\bar{g}_0} 2^{2\rho_1 + 2^{m+1} - |\bar{g}_0|}.$$

3. Композицию из пункта 2 исследуем на предмет реализации  $x \oplus y$ . Если решение существует, то, учитывая, что в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  функция  $x \oplus y = (\bar{x} \vee \bar{y}) \cdot (x \vee y) = \overline{xy} (x \vee y)$  реализуется со сложностью 4, композиция же элементов с вирусами имеет сложность 2. Это значит, что минимальная сложность схемы, реализующей в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  счетчик четности  $x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n$  сложности  $4(n-1)$ , теперь будет в базисе с вирусами иметь сложность  $2(n-1)$ . То есть «симбиоз» вирусов может упростить схемную реализацию. Производя аналогичный анализ композиции  $h = g(x, f(x, y, \tilde{z}), \tilde{z})$ , мы приходим вместо системы (11) к системе

$$\begin{cases} g_0 \leq f_0 \leq \bar{g}_1, \\ \bar{g}_0 \leq f_1 \leq g_1, \\ \bar{g}_2 \leq f_2 \leq g_3, \\ g_2 \leq f_3 \leq \bar{g}_3. \end{cases} \quad (15)$$

Два последних двойных неравенства в (15) совпадают с аналогичными неравенствами в (11). Поэтому имеем сразу  $\bar{g}_3 = g_2 = f_2 = f_3$ . Поскольку два первых двойных неравенства в (15)

по форме такие же, как два последних, то имеем  $\bar{g}_1 = g_0 = f_0 = f_1$ . Отсюда имеем выражения для функций  $f$  и  $g$  :

$$g(x, y, \tilde{z}) = \bar{x} \bar{y} g_0 \oplus \bar{x} y \bar{g}_0 \oplus x \bar{y} g_2 \oplus x y \bar{g}_2 = \\ = \bar{x} (g_0 \oplus y) \oplus x (g_2 \oplus y) = \bar{x} g_0 \oplus x g_2 \oplus y,$$

где  $g_0, g_2$  – независимы;

$$f(x, y, \tilde{z}) = (\bar{x} \bar{y} \oplus \bar{x} y) f_0 \oplus (x \bar{y} \oplus x y) f_2 = \\ = \bar{x} f_0 \oplus x f_2 = \bar{x} g_0 \oplus x g_2 = g(x, y, \tilde{z}) \oplus y.$$

Число вариантов решений равно  $2^{2^{m+1}}$ . Интересно отметить получившуюся формулу связи двух элементов композиции  $f(x, y, \tilde{z}) \oplus g(x, y, \tilde{z}) = y$  и раскрыть ее технический и биологический смысл.

**Заключение.** Из тезиса Дж. фон Неймана следует, что для того, чтобы строить сколь угодно надежные схемы, необходимо, чтобы базис содержал вполне надежные элементы. В статье доказана ограниченность применимости тезиса Дж. фон Неймана (пример на рисунке 1 [8]). Для построения сколь угодно надежных схем необходимо, чтобы базис содержал элемент, вполне надежно выпускающий значения 0 и 1, причем в схеме булевы случайные величины, относящиеся к различным элементам схемы, остаются (как у Дж. фон Неймана) стохастически независимыми.

Результаты проведенного исследования применимости тезиса Дж. фон Неймана в теории надежного синтеза управляющих систем показывают целесообразность и возможность построения антитезиса: вероятность ошибки схемы из функциональных элементов может быть ниже вероятности ошибки конечного элемента схемы при выполнении условий стохастической зависимости функциональных элементов схемы друг от друга. В статье представлены примеры таких случаев, когда тезис Дж. фон Неймана не выполняется: базис  $\{x \oplus y, \varphi_1, \varphi_2\}$  (таблица 1), а также рассмотренные базисы с вирусными элементами.

Полученные результаты расширяют функциональные возможности синтеза надежных схем, в том числе в условиях неприменимости тезиса Дж. фон Неймана (в отличие от предыдущих работ), что позволит снизить сложность отдельных схем.

#### Библиографический список

1. Нейман Дж. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент. – Сб. Автоматы / под ред. К.Э. Шеннона и Дж. Маккарти. – М.: ИЛ, 1956. – С. 129–185.
2. Ортюков С.И. К вопросу о синтезе асимптотически безызбыточных самокорректирующихся схем из функциональных элементов // Проблемы пе-

редачи информации. – 1977. – Т. 13, вып. № 4. – С. 3–8.

3. *Алехина М.А.* О надежности схем из функциональных элементов при однотипных неисправностях на выходах элементов // Дискретная математика. – 1993. – Т. 5, вып. № 2. – С. 59–74.

4. *Кириенко Г.И.* О самокорректирующихся схемах из функциональных элементов // Проблемы кибернетики. – М.: Наука, 1964. – Вып. № 12. – С. 32–38.

5. *Мучник А.А., Гиндикин С.Г.* Решение проблемы полноты для систем функций алгебры логики с ненадежной реализацией // Проблемы кибернетики. – М.: Наука, 1966. – Вып. № 15. – С. 65–85.

6. *Тарасов В.В.* К проблеме полноты для систем функций алгебры логики с ненадежной реализацией // Математический сборник. – 1975. – Т. 98, № 3. – С. 378–394.

7. *Яблонский С.В., Гаврилов Г.П., Кудрявцев В.Б.* Функции алгебры логики и классы Поста. – М.: Наука, 1966. – 120 с.

8. *Тарасов В.В.* К синтезу надежных схем из ненадежных элементов // Математические заметки. – 1976. – Т. 20, № 3. – С. 391–400.

9. *Тарасов В.В.* Резервы обеспечения надежности синтеза логических схем // Кибернетика и системный анализ. – Киев: Наукова Думка, 1992. – Вып. № 2. – С. 167–172.

10. *Тарасов В.В.* Функциональные возможности стохастических базисов в расширенной суперпозиции Яблонского // Российский научный журнал. – М.: Издатель АНО «РИЭПСИ», 2008. – Вып. № 4 (№ 5). – С. 222–230.

11. *Тарасов В.В.* Функции алгебры логики с собственными параметрами // Проблемы передачи информации. – 2000. – Т. 36, № 4. – С. 113–116.

УДК 621.391

*А.В. Пруцков, Д.М. Цыбулько*

## АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРНЕТ-ПРИЛОЖЕНИЯ ОБРАБОТКИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЯЗЫКОВ

*Авторами статьи было разработано Интернет-приложение обработки количественных числительных естественных языков. За полтора года работы Интернет-приложения была собрана статистика его использования, включающая более 15 000 записей о запросах. В статье проведен анализ полученной статистики и сформулированы направления дальнейшего развития Интернет-приложения.*

**Ключевые слова:** автоматическая обработка текста, числительные, Интернет, анализ статистики посещений.

**Введение.** В работе [1] был предложен метод обработки количественных числительных естественных языков. Метод позволяет производить следующие операции над количественными числительными: генерировать и определять их словоформы (в терминах работы [2]), преобразовывать количественные числительные в символьную (числительное) и цифровую формы (число) (в терминах работы [3]). Алгоритмы обработки числительных записаны с помощью нормальных алгоритмов Маркова [4] и их модификации – линейных нормальных алгоритмов [5]. Метод обработки числительных первоначально был реализован в виде приложения для операционной системы (ОС) Windows XP (приложение BRETТА, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615475, Российская Федерация), а затем – в виде Интернет-приложения [3] (приложение

CLEDONIA, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661379, Российская Федерация).

Интернет-приложение выполняет две основные функции: перевод количественных числительных русского, английского, немецкого, испанского и финского языков на любой из перечисленных языков, проверку знаний правил образования количественных числительных. Отличительной особенностью Интернет-приложения является использование промежуточного этапа в преобразованиях количественных числительных, названного моделью числительного. Принцип функционирования Интернет-приложения описан в работе [3].

С марта 2012 года Интернет-приложение размещалось на серверах сервиса бесплатного хостинга ismywebsite.com по адресу: <http://dreamland.ismywebsite.com>. Именно этот

адрес указан в работе [3]. Однако 14 августа 2012 года сервис ismywebsite.com прекратил свое существование. Все попытки его реанимирования закончились неудачей. Вместе с закрытием сервиса ismywebsite.com прекратился доступ и к Интернет-приложению. В сентябре 2012 года было решено перенести Интернет-приложение на серверы платного хостинга с собственным доменом prutzkow.com для его надежного функционирования. С этого времени Интернет-приложение доступно по адресу: <http://prutzkow.com/numbers/>.

За время работы Интернет-приложения была собрана статистика его использования, включающая более 15 000 записей о запросах на обработку числительных, сделанных посетителями, количество которых превысило 2 000.

**Целью данной статьи** являются представление и анализ результатов работы Интернет-

приложения, выявление направлений его дальнейшего развития.

Посетители Интернет-ресурса делают запросы на обработку числительных. Данные о запросе включают дату и время запроса, IP-адрес посетителя, введенный им текст запроса, направление преобразования (язык, число) и результат преобразования. Анализ записей такого формата позволил сделать следующие выводы.

**Анализ статистики запросов к Интернет-приложению.** Наиболее популярными направлениями перевода являются «число – немецкий язык» и «число – русский язык» (таблица 1). В большинстве случаев (почти 90 % всех запросов) исходным объектом перевода является число, что можно объяснить двумя причинами. Во-первых, число проще вводить, чем числительное. Во-вторых, Интернет-приложение чаще используется для перевода с родного на иностранный язык.

**Таблица 1**

Куда переводится / Откуда переводится	Русский	Английский	Испанский	Немецкий	Финский	Число	Общий итог
Русский	–	1,3 %	<1 %	5,2 %	<1 %	<1 %	8,2 %
Английский	<1 %	–	<1 %	<1 %	<1 %	<1 %	0,3 %
Испанский	<1 %	<1 %	–	0 %	0 %	<1 %	0,2 %
Немецкий	<1 %	<1 %	<1 %	–	<1 %	<1 %	1,5 %
Финский	<1 %	0 %	0 %	0 %	–	<1 %	0,2 %
Число	31,3 %	9,0 %	7,5 %	39,5 %	2,3 %	–	89,6 %
Общий итог	32,3 %	10,3 %	8,1 %	44,7 %	2,7 %	1,9 %	100,0 %

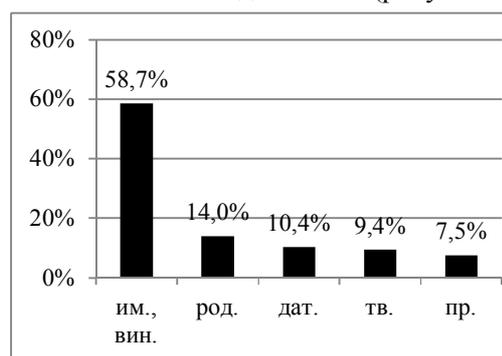
Невысокая доля переводов на/с английского языка, несмотря на большую распространенность этого языка, объясняется существованием сильных конкурентов в этом сегменте перевода числительных. Сравнительный анализ разработанного Интернет-приложения и его аналогов приведен в работе [3].

Двумя основными причинами ошибочных запросов (не учтены в таблице 1) являются неверный формат ввода или попытка перевода не количественных числительных. В случае ошибочного запроса пользователь Интернет-приложения может получить пояснения и примеры форматов и диапазонов вводимых количественных числительных.

Другой функцией Интернет-приложения является склонение числительных русского языка по падежам (рисунок 1).

Изучение количественных числительных делят на части: изучение единиц (0–9), чисел от 10 до 19, десятков (20–99), сотен (100–999), тысяч (1000–999999) и остальных числительных. Наибольшие затруднения при изучении этого

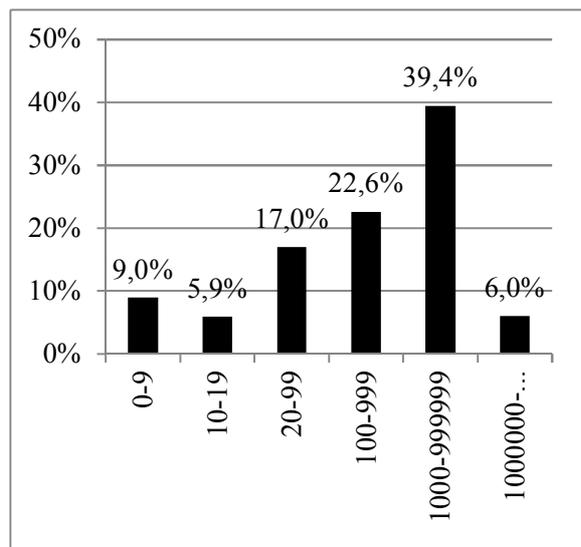
раздела языкознания вызывают количественные числительные от 1000 до 999999 (рисунок 2).



**Рисунок 1 – Доли результатов перевода на русский язык в зависимости от падежей**

Из статистики запросов можно выделить статистику посещений пользователями.

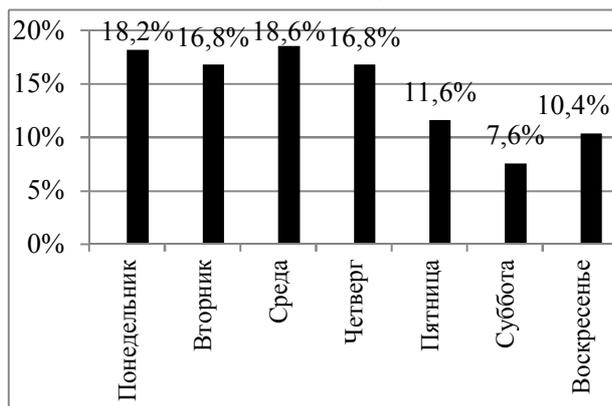
**Анализ статистики посетителей Интернет-приложения.** Под уникальным посетителем в работе понимается пользователь, делающий запросы к Интернет-приложению с одного и того же IP-адреса, если разница между запросами составляла меньше одного часа (60 минут).



**Рисунок 2 – Доли запросов в зависимости от значения модуля целой части**

Первоначально статистика запросов использовалась только для отладки Интернет-приложения. Однако для анализа статистики было необходимо преобразовать записи о запросах в более удобный для обработки формат, добавить вспомогательные данные. Например, для определения страны и города по IP-адресу использовалась специализированная библиотека на языке PHP.

Из более высокого уровня посещений в будние дни можно сделать вывод, что посетители используют Интернет-приложение, прежде всего, для работы или учебы (рисунок 3). Всплеск посещений в понедельник связан с отложенными запросами в пятницу, субботу и воскресенье («отложить до понедельника»).



**Рисунок 3 – Доли посетителей в зависимости от дня недели**

Пользователями Интернет-приложения являются не только посетители из Российской Федерации, но и из других стран. В таблице 2 приведены страны и территории, доля посетителей из которых составляет не менее 1 %.

**Таблица 2**

Страна / территория	Доля
Российская Федерация	72,3 %
Украина	9,1 %
Польша	4,0 %
Беларусь	3,6 %
Европа	3,1 %
Германия	1,4 %
Казахстан	1,2 %
Остальные 31 страна	5,3 %

IP-адреса, приписанные к Европе, принадлежат, как правило, крупным компаниям с отделениями в европейских странах.

В таблице 3 приведены ежемесячные индексы посещаемости и доли посетителей из Российской Федерации. В индексе посещаемости (таблица 3, колонка 2) за 100 % принят октябрь 2012 года – первый месяц полноценной работы на новом хостинге. Падение посещаемости в декабре и в летние месяцы подтверждает вывод о том, что Интернет-приложение используется для работы и учебы. Осенью 2013 года, с началом учебного года индекс посещаемости вновь поднялся и превысил прежний, весенний уровень.

**Таблица 3**

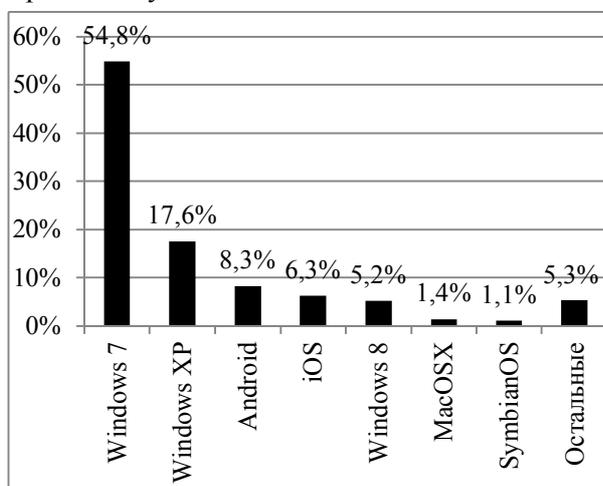
Год, месяц	Индекс посещаемости	Доля посетителей из России
1	2	3
2012, март	30 %	73 %
2012, апрель	27 %	73 %
2012, май	43 %	72 %
2012, июнь	8 %	75 %
2012, сентябрь	29 %	57 %
2012, октябрь	100 %	71 %
2012, ноябрь	103 %	64 %
2012, декабрь	95 %	73 %
2013, январь	111 %	71 %
2013, февраль	113 %	78 %
2013, март	81 %	80 %
2013, апрель	105 %	72 %
2013, май	84 %	75 %
2013, июнь	72 %	63 %
2013, июль	58 %	71 %
2013, август	61 %	81 %
2013, сентябрь	143 %	72 %
2013, октябрь	165 %	79 %

Необходимо учесть, что в первый месяц работы на новых хостингах в марте и в сентябре 2012 года запросы фиксировались с 10-х чисел этих месяцев, а в июне 2012 года статистика велась только 6 первых дней месяца.

Для повышения доли запросов из зарубежных стран (таблица 3, колонка 3) создана англоязычная версия Интернет-приложения, находящегося по адресу: [http://prutzkow.com/numbers/index\\_en.htm](http://prutzkow.com/numbers/index_en.htm), и размещены ссылки на Интернет-приложение в зарубежных каталогах лингвистических ресурсов и на специализированных форумах.

**Анализ аппаратного и программного обеспечения устройств посетителей Интернет-приложения.** С помощью вспомогательных онлайн-ресурсов была собрана статистика браузеров, ОС и характеристик дисплеев устройств, используемых посетителями. Статистика включает записи о 500 последних посещениях Интернет-приложения, что отражает актуальное положение с использованием программного и аппаратного обеспечения.

Новейшая ОС Windows 8 пока не получила широкого распространения (рисунок 4). Такое положение можно объяснить снижением использования настольных и переносных компьютеров и распространением смартфонов и планшетов на ОС Android и iOS, а также удовлетворенностью пользователей функциональностью установленной на компьютере версии ОС Windows. Поэтому значительное количество посетителей до сих пор используют ОС Windows XP.



**Рисунок 4 – Операционные системы, используемые посетителями**

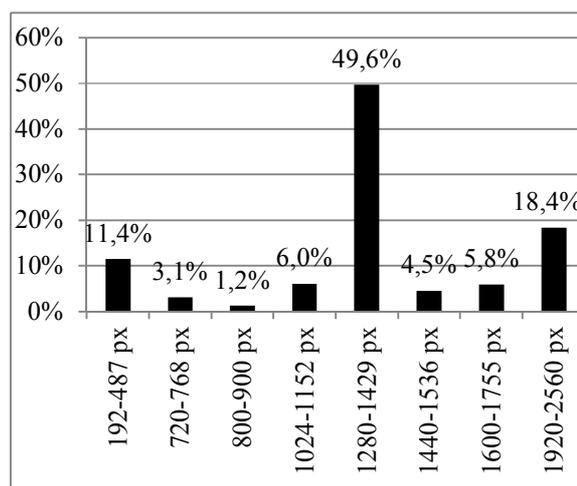
Несмотря на то, что браузер Internet Explorer компании Microsoft предустановлен в наиболее распространенных ОС семейства Windows, наиболее популярным является браузер Chrome компании Google (таблица 4).

При разработке интерфейса Интернет-приложения необходимо учитывать разрешение дисплеев, используемых посетителями (рисунок 5). Интерфейс разработан для дисплеев с горизонтальным разрешением 1024–1366 пикселей.

Статистика используемых браузеров, ОС и характеристик дисплеев учитывается в дальнейшей разработке и развитии Интернет-приложения.

**Таблица 4**

Браузер	Доля
Chrome, в том числе версия 30 – 27,3 %	35,3 %
Opera, в том числе версия 17 – 4,7 % версия 12.1 – 8,3 %	16,5 %
Internet Explorer, в том числе версия 10 – 10,5 % версия 9 – 3 % версия 8 – 2,8 %	16,3 %
Браузеры мобильных устройств, в том числе Opera – 6,1 %	11,3 %
Яндекс.Браузер	8,3 %
Firefox, в том числе версия 24 – 3,3 %	6,3 %
Safari	3,0 %
Остальные	3,0 %



**Рисунок 5 – Разрешения дисплеев (указана горизонтальная составляющая), используемых посетителями**

**Заключение.** В последние месяцы Интернет-приложением ежемесячно пользовались более 200 посетителей. Несколько посетителей воспользовались Интернет-приложением более 30 раз. Подчеркнем, что речь идет о посетителях, которые делали запросы к Интернет-приложению, а не просто зашли на его веб-страницу.

Направлениями дальнейшего развития Интернет-приложения являются следующие:

- привлечение посетителей из зарубежных стран;
- добавление новых языков (например, французского или украинского);
- предоставление функций Интернет-приложения как веб-сервиса для сторонних разработчиков программных продуктов, в том чис-

ле и на мобильных платформах (пример программы для перевода числительных доступен для посетителей на странице Интернет-приложения).

Планируется сделать Интернет-приложение, реализующее проверку знаний правил образования количественных числительных, частью более крупного информационного ресурса для обучения естественным языкам [6], куда также входит система генерации и определения словоформ [2].

Для записи сценариев проверки знаний будут использоваться объекты проблемно-ориентированного объектного программирования (ПООП). Пример сценария проверки знаний представлен в работе [7].

Приведенная статистика использования Интернет-приложения будет полезна другим разработчикам веб-сайтов.

Данная статья является промежуточным итогом научной работы по разработке и практическому применению метода обработки количественных числительных, развиваемого в работах, перечисленных в библиографическом списке.

Авторы выражают благодарность Татьяне Викторовне Пруцковой за помощь в обработке статистики и подготовке статьи.

### Библиографический список

1. Пруцков А.В. Обработка числительных естественных языков с помощью формальных грамматик и нормальных алгоритмов Маркова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2009. – № 28. – С. 49–55.
2. Пруцков А.В. Генерация и определения форм слов естественных языков на основе их последовательных преобразований // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2009. – № 27. – С. 51–58.
3. Пруцков А.В., Цыбулько Д.М. Интернет-приложение метода обработки количественных числительных естественных языков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2012. – № 41. – С. 70–74.
4. Марков А.А., Нагорный Н.М. Теория алгоритмов. – М.: Наука, 1984. – 432 с.
5. Пруцков А.В. Линейные нормальные алгоритмы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2010. – № 33. – С. 39–45.
6. Пруцков А.В. Применение информационных ресурсов для автоматизации обучения и проверки знаний // Информационные ресурсы России. – 2005. – № 1. – С. 18–20.
7. Пруцков А.В., Цыбулько Д.М. Проблемно-ориентированное объектное программирование // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – № 45. – С. 57–62.

УДК 621.391

*Д.П. Малёбу, В.А. Корнеев*

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОЙ СЕТИ СВЯЗИ РЕСПУБЛИКИ АНГОЛА НА ОСНОВЕ DWDM

*Основной целью данного исследования является разработка проекта модернизации национальной сети связи с целью повышения пропускной способности действующей магистральной ВОЛС с использованием технологии DWDM для обеспечения широкополосного многофункционального трафика с высокими доступностью и качеством услуг. На основе анализа существующей сети разработана наиболее рациональная топология сети, обеспечивающая полное информационное покрытие территории Республики, даны оценки прямого и возвратного информационного трафика магистрального ядра и радиальных ветвей сети.*

**Ключевые слова:** модернизация, повышение пропускной способности, ВОЛС, технология DWDM.

**Введение.** В настоящее время системы связи стали одной из основ развития общества. Рост потребностей в передаче информации привел к тому, что в конце 1990-х годов объемы передаваемой информации по международным сетям

связи многократно возросли за счет такого феномена, как Интернет. Последовавший рост пропускной способности каналов связи намного превысил самые смелые прогнозы. Это предъявляет новые требования к современным сетям

связи, их пропускной способности. Общеизвестно, что удовлетворить потребности человеческого общества в передаче максимального объема информации можно только на основе волоконно-оптических систем связи (ВОЛС).

К основным преимуществам ВОЛС относятся: высокая помехоустойчивость; слабая зависимость качества передачи от длины линии; стабильность параметров каналов ВОСП; возможность построения цифровой сети связи; и самое главное – высокие технико-экономические показатели.

Многоканальные волоконно-оптические системы передач (ВОСП) широко используются на магистральных и зональных сетях связи страны, а также для устройства соединительных линий между городскими АТС. Объясняется это тем, что ВОЛС обладает очень широкой полосой пропускания. Особенно эффективны и экономичны подводные солитонные оптические магистрали.

**Цель работы:** разработка проекта модернизации национальной сети с целью существенно увеличения пропускной способности магистральной ВОЛС.

По данным исследований, глобальный информационный трафик растет очень динамично. По данным компании Apple, ожидается, что до 2016 года глобальный мировой трафик превысит  $1.3 \cdot 10^{21}$  байт в год, т.е.  $110 \cdot 10^{18}$  байт в месяц.

Этот показатель почти в четыре раза превышает скорость роста трафика 2011 года. Этот рост происходит в основном за счёт стран Ближнего Востока и Африки. Именно в этих регионах чрезвычайно актуальна организация инфраструктуры, способной удовлетворить спрос за счёт реализации глобальной гибкой телекоммуникационной сети широкополосной передачи данных. Основные требования, предъявляемые к этой сети, – функционирование на принципах интеграции с уже существующими сетями и обеспечение перспективного роста трафика. Сеть должна поддерживать существующие услуги и интеграцию новых услуг, обеспечивать высокие пропускную способность, доступность и гибкость, безопасность, регламентное качество и надежность.

И именно поэтому в любой части земного шара все усилия государственных и частных учреждений направлены на поиск решений для поддержки растущего спроса на трафик данных как в реализации новых сетей, так и в модернизации существующих сетей.

Принимая это во внимание, можно сказать, что национальные транспортные сети передачи данных Республики Ангола не удовлетворяют информационные потребности населения, так

как используемые в настоящее время информационные технологии базируются на медных фидерных и радиорелейных линиях. Хорошо известно, что фидерная сеть на основе медных кабелей имеет ограниченную пропускную способность, низкое качество из-за огромных потерь вдоль линии в результате ослабления сигнала, низкий уровень безопасности и надежности. Кроме того, на рынке присутствует оборудование, способное обеспечить значительную пропускную способность радиорелейных линий, но одни они не в состоянии удовлетворить существующие требования. Другим фактором, который будет учитываться, является частотный спектр, который исчерпан и не приводит к масштабированию радиорелейных линий.

По этой причине в этой работе предлагается модернизировать и увеличить пропускную способность действующих национальных транспортных сетей передачи данных, используя в качестве основы технологии мультиплексирования для плотного разделения по длине волны (DWDM), разработку новой топологии, основанной на радиально-кольцевой топологии [1], полную замену медного кабеля на волоконно-оптический кабель и его оборудования на всех участках, где они существуют. Следует отметить, что это изменение должно быть сделано постепенно.

Для создания инфраструктуры по передаче данных, которая удовлетворяла бы всем этим условиям, проведён сравнительный анализ текущего состояния существующей инфраструктуры и на основании полученных результатов принято решение о внедрении новой сети или модернизации существующих. При анализе систем передачи данных и технологий, представленных в настоящее время на рынке, предпочтение отдавалось тем аппаратным решениям и технологиям, которые удовлетворяют требованиям, упомянутым выше.

Транспортная сеть и прежде всего оптическая транспортная сеть, является основой любой реальной сети связи от магистральной до местной и в том числе сети доступа. Транспортная сеть — это универсальная неспециализированная среда доставки информационных сообщений в любом формате (ячейки АТМ, пакеты Ethernet, пакеты MPLS, циклы PDH и т.д.). Транспортная сеть — базовая сеть типовых универсальных каналов передачи, сетевых трактов и секций передачи, на основе которых формируются возможности вторичных сетей связи, обеспечивающих спектр услуг через специализированные пользовательские интерфейсы для отдельных видов услуг (телефония, Интернет, телевидение и т.д.)

и интегрированных услуг. При этом транспортная сеть должна быть полностью прозрачной для пользовательских услуг [2].

Прозрачность транспортной сети закладывается при планировании и последующем детальном проектировании, которые опираются на следующие принципы:

- сеть планируется с учетом длительной перспективы (от 5 до 20 лет) ее развития и изменения;

- осуществляется учет специальных условий и требований заказчика (пользователя) транспортной сети;

- предусматривается необходимый уровень эксплуатации транспортной сети и кадровый потенциал;

- определяется существующая и перспективная нагрузка сети с подразделением на виды и объемы предоставляемых услуг (коммутируемые каналы, коммутируемые виртуальные каналы, пакетная передача с заданным качеством и т.д.);

- выбираются подходящая среда передачи (оптоволокно, стволы радиолиний, медные провода) и базовые транспортные технологии (SDH, OTN, ATM, Ethernet, T-MPLS);

- выполняется обоснованный выбор архитектуры транспортной сети;

- обосновывается использование методов повышения надежности сети через реализацию видов защиты линейных и групповых трактов, резервирования оборудования и т.д.;

- разрабатываются схемы организации связи, синхронизации и управления;

- рассчитываются передаточные характеристики линейных трактов;

- оптимизируется использование оборудования и линий;

- производится комплектация выбранного оборудования и оценка стоимостных показателей;

- оптимизируется сеть по стоимостным и качественным показателям при сравнении как минимум двух вариантов топологий, оборудования, линейных сооружений и т.д. [3, 4].

Перечень этих принципов планирования необходимо использовать при формулировании требований к проектируемой транспортной сети и ее характеристикам:

- сеть должна обеспечивать пропускную способность или базовые скорости передачи в STM-N, OTUk или волновыми каналами  $\lambda_i$ ;

- сеть должна обеспечить перенос суммарного трафика в трактах магистралей;

- сеть должна удовлетворять заданным значениям надежности или коэффициента готовности;

- сеть должна быть расширяемой;

- сеть должна быть управляемой;

- в сети должно совмещаться оборудование различных производителей;

- сеть должна быть устойчива к повреждениям, сбоям и т.д.

Принципы и требования по планированию и проектированию транспортной сети отражают общий подход к процессу проектирования [2].

Плотное мультиплексирование по длине волны (DWDM) является расширением оптических сетей. DWDM устройства сочетают выход из нескольких оптических передатчиков для передачи по одному оптическому волокну. На приемном конце другого устройства DWDM отделяет комбинированные оптические сигналы и передает каждый канал к оптическому приемнику [5].

DWDM технология может быть применена к различным областям в телекоммуникационной сети, которая включает в себя магистральные сети, жилой сетевой доступ, а также локальные сети (LAN) [6].

Важно отметить что, существует много других работ связанных с технологией DWDM [7, 8, 9].

Ресурс ОК по пропускной способности определяется произведением числа волокон на число оптических каналов и на предельную скорость в каждом канале при данной протяженности участка линии передачи:

$$C = N_{OB} \cdot N_{\text{ОПТ.КАН}} \cdot V_{\text{ПРЕД}}, \quad (1)$$

где  $C$  – пропускная способность ВОСП;

$N_{OB}$  – количество ОБ в ОК, определяется конструкцией ОК, для максимального повышения пропускной способности данная величина должна быть большой;

$N_{\text{ОПТ.КАН}}$  – количество оптических несущих, передаваемых по технологии DWDM, на момент рассмотрения  $N_{\text{ОПТ.КАН}} = 40$  и  $160$  (см таблицу), впоследствии подлежит уточнению;

$V_{\text{ПРЕД}}$  – предельная скорость передачи по ОБ, определяется уровнем SDH, предполагается переход на уровень STM-16 (2.5 Гбит/с) и STM-64 (10 Гбит/с) [2].

Есть важная особенность, которую необходимо отметить, это то, что помимо учета предельной скорости передачи и количества оптических каналов, передаваемых в ОБ, необходимо разобраться, сколько ОЦК (64 кбит/с) можно передать по этой ВОЛС и как этим числом можно варьировать, при этом используя его для других приложений.

С помощью рассматриваемой ВОСП производится передача  $N_{исх}$  каналов ОЦК. Необходимо добиться  $N_{ппс}$  каналов – количества каналов при повышенной пропускной способности, то есть:

$$N_{ппс} = k \cdot N_{исх} \quad (2)$$

Исходя из того, что уже спроектированы и введены в эксплуатацию ВОСП, у которых коэффициент  $k$  ( $k$  – коэффициент увеличения пропускной способности, соответственно увеличения числа каналов) принимает следующие значения:  $k = 2, 4, 8, 16, 32, \dots, n$ , следует вывод, что  $k$  лежит примерно в следующем интервале:  $1 < k \leq 240$ . Так как стоит цель резкого повышения пропускной способности, как ясно из темы статьи, то  $k$  должен лежать в интервале  $k > 100$ . При этом возникает вопрос, какого порядка  $k$  необходимо задать и какого порядка коэффициент  $k$  реально может получиться, к примеру: 10, 50, 100, 150 или 200 [2].

Для расчета пропускной способности сетей передачи данных на настоящий момент нет единой методики оценки. В данной работе предложена методика расчета, основывающаяся на маркетинговых исследованиях пользователей Интернет, а также исследованиях провайдеров городов, входящих в проектируемую сеть.

При расчете пропускной способности учитывается возвратный трафик, проходящий через сеть, который принимается равным исходящему трафику, увеличенному на значение транзитного трафика, проходящего по центральному ядру (Луанда, Маланже и Бие).

Расчет трафика производился в предположении, что исходящий трафик в 10 раз меньше возвратного.

Выбранное оборудование должно удовлетворять следующим требованиям:

- большие регенерационные участки линии;
- высокая емкость оборудования;
- большое количество каналов в секции;
- высокая скорость доступа (Гбит/с);
- возможность подключения Ethernet транспондера;
- возможность плавного расширения конфигурации;
- организация оптических каналов согласно рекомендации ITU-T G.709.

В данной работе предлагается использовать оборудование компания Huawei для повышения пропускной способности магистральной сети Республики Ангола, так как оно удовлетворяет вышеперечисленным требованиям.

Это оборудование включает в себя окончные оптические волновые передатчики, усилите-

ли, фильтры, аппаратуру управления сетью, а также комплексы гребенчатых планарных волноводов, которые демультиплексируют сигналы на приемном конце линии передачи.

Для проектируемой сети целесообразно использовать оборудование DWDM на участках с высокими требованиями к пропускной способности, которые относятся к ядру в Луанде, и на всей протяженности магистральной (красной) линии. Для элементов сети, подключаемых к ядру в городе Маланже и Бие, требования к числу каналов и их пропускной способности менее высокие. Поэтому на этих участках планируется установка оборудования CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing).

Среди всего оборудования этой компании, которое представлено на рынке, в наибольшей степени удовлетворяет предъявляемым требованиям оборудование Optix BWS 1600G – I, Optix BWS 1600G – III и Optix BWS 1600G – V [10].

#### Характеристика оборудования Optix BWS 1600G

Модель	Optix BWS 1600G-I	Optix BWS 1600G-III	Optix BWS 1600G-V
Характеристика			
Установленная мощность, Вт	2000	2000	2000
Расстояние передачи без регенерации, км	360	2000	640
Максимальная скорость доступа, Гбит/с	10	10	2.5
Максимальное количество каналов	160	40	40
Диапазон рабочих длин волны	C- и L-диапазоны	C-диапазон	C-диапазон
Максимальная емкость, Гбит/с	1600	400	100

**Заключение.** В результате был разработан проект модернизации национальной сети связи с существенным повышением пропускной способности действующей магистральной ВОЛС с использованием технологии DWDM для обеспечения широкополосного многофункционального трафика с высокой доступностью и качеством услуг, разработана новая топология «радиальное кольцо», как показано на карте (см рисунок).

Данная топология совместима с магистральной радиорелейной линией, что даёт возможность осуществлять межсетевое дублирование оптических и радиорелейных линий для увеличения пропускной способности сети, сохранения непрерывности информационного трафика в

случае отказов либо перегрузок для повышения надежности сети.



**Топология магистральной ВОЛС  
Республика Ангола**

#### Библиографический список

1. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (ATM, PDH, SDH, SONET и WDM). – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.
2. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и

транспортные сети: учеб. пособие. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 288 с.: ил.

3. РД 45.286-2002. Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования. – М.: ЦНТИ «Инфраструктура», 2002. (утв. Минсвязи РФ, введен Приказом Минсвязи РФ от 29.08.2002 № 108).

4. Андрэ Журар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM: пер. с англ. – М.: EXFO, 2001. – 264 с.

5. Reena Antil, Pinki, Mrs. Sonal Beniwal. An Overview of DWDM Technology & Network // International Journal of Scientific & Engineering Research. Volume 4, Issue 1, January – 2013. – P. 43–46.

6. Dominik Bischoff. Wavelength multiplexing: WDM and DWDM systems. February 4, 2009. – 27 p.

7. Shaowen Song. An Overview of DWDM Networks // IEEE Canadian Review - spring / Printemps, 2001.

8. Ozolins O., Ivanovs G.. Estimation of DWDM Transmission for Broadband Access with FBG Technology // ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING. ISSN 1392 – 1215, 2011. No. 5(111). – P. 11–14.

9. Ross Saunders. Coherent DWDM technology for high speed optical communications. Optical Fiber Technology. 17 (2011), P. 445–451, 7 September 2011.

10. Optix BWS 1600G Backbone DWDM Optical Transmission System Technical Description. Version: T2-040269-20060630-C-1.32., 2006. – 240 p.

УДК. 621.391

**А.В. Егоров, А. Жоау**

## ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НИЗКОСКОРОСТНОГО КОДЕРА РЕЧИ

*В современных телекоммуникационных системах для передачи речи используются низкоскоростные кодеры. Из ряда кодеров, использующих модель линейного предсказания, для дальнейшего исследования и модернизации был выбран кодер MELP. Выполнено исследование зависимости качества кодирования речевого сигнала при изменении порога чувствительности кодера в соответствии с ГОСТ Р 51061-97. Проведено исследование влияния ошибки в канале на качество восстановления речи, и сделано предложение о совместном кодировании источника и канала, что позволило обеспечить смысловую разборчивость речи при интенсивной битовой ошибке за счет перераспределения битового бюджета между информационной и проверочной частями кода.*

**Ключевые слова:** низкоскоростной кодер речи, помехоустойчивое кодирование, оценка качества речи.

**Введение.** В последние годы методы кодирования, обеспечивающие низкую скорость передачи (менее 4.0 кбит/с) представляют значительный интерес в рамках стремления к мини-

мальной скорости кода при высоком качестве восстановления речи. Эти кодеры нашли применение в массе приложений, таких как голосовая почта для мобильной связи, спутниковые систе-

мы связи и т.д. Некоторые методы низкоскоростного кодирования речи стали использоваться в телекоммуникационных системах относительно недавно. Эти кодеры могут быть разделены на две основные группы:

а) кодеры формы сигнала (Waveform approximating coders), которые минимизируют ошибку между восстановленным и исходным речевыми сигналами;

б) параметрические кодеры, при использовании которых кодируются параметры модели синтеза речи.

Одной из основных задач данной публикации является модернизация низкоскоростного кодера речи для повышения его помехозащищенности при сохранении битовой скорости. Данная проблема актуальна при невозможности повышения кодового расстояния с сохранением битовой скорости кодера источника. Задача может быть решена за счет перераспределения бит между кодером источника и кодером канала для повышения корректирующей способности избыточного кода за счет некоторого ухудшения разборчивости восстановления речи.

Целью исследования является модернизация кодера для повышения его помехозащищенности при сохранении битовой скорости.

**Низкоскоростные кодеры речи.** Основываясь на весьма упрощенной модели формирования речи, алгоритм кодирования на основе линейного предсказания (LPC) является одним из самых ранних стандартизированных кодеров, который работает при низкой скорости передачи – 2.4 кбит/с. FS1015 LPC кодер [1] являлся в свое время достижением в развитии кодирования речи, при том, что качество передачи речи обеспечивалось достаточно низким. Линейное предсказание с кодовым возбуждением CELP представляет собой алгоритм кодирования речи, первоначально предложенный М.Р. Шредером и Б.С. Аталом в 1985 году. В то время алгоритм обеспечивал значительно лучшее качество, чем существовавшие тогда алгоритмы с низким битрейтом, такие, как аудиокодеки RELP и LPC. CELP в настоящее время используется как общий термин для класса алгоритмов, а не для определенного кодера. Для преодоления некоторых недостатков LPC разработан кодер линейного предсказания со смешанным возбуждением (MELP). Он использует более сложные модели формирования речи с дополнительными параметрами кода, что обеспечивает сохранение основных характеристик сигнала с повышенной точностью [1]. MELP кодер базируется на традиционной параметрической модели кодирования с линейным предсказанием (LPC), а также

использует четыре дополнительные функции. К ним относятся: смешанное возбуждение, аperiodические импульсы возбуждения, адаптивная фильтрация, дисперсия импульсов возбуждения (рисунок 1).

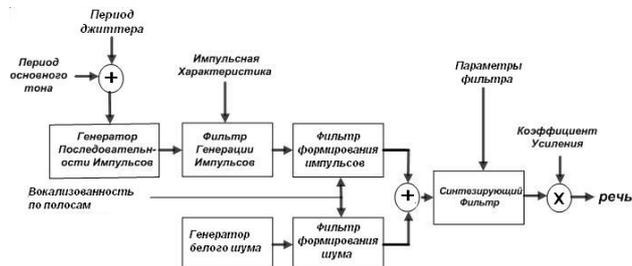


Рисунок 1 – Модель MELP формирования речи

В таблице показано распределение бит по параметрам в 54-битном в кадре MELP.

#### Распределение бит для кодера MELP

Параметры	вокализованный	невокализован
	кадр	ный кадр
Линейные спектральные частоты (LSF / MSQV)	25	25
Амплитуды преобразования Фурье (FM / QFM)	8	-
Коэффициенты усиления (2 за кадр, G1 и G2)	8	8
Период основного тона (P / Qpitch)	7	7
Вокализованный по полосам (Vrb)	4	-
Флаг неперодичности (AF)	1	-
Защита от ошибок (FEC)	-	13
Синхробит	1	1
Всего за кадр 22.5 мс	54	54

#### Оценка качества восстановления речи.

Как известно, одним из важных факторов при выборе типа кодера является качество восстановления сигнала. Для оценки качества могут быть применены как объективные, так и субъективные методы оценки.

Объективные оценки качества передачи получают с помощью технических средств, обеспечивающих лучшую повторяемость результатов по сравнению с субъективными оценками [2]. За последние годы в практику внедрен целый ряд новых достаточно эффективных компьютерных методов расчета качества речи в различных условиях.

Тем не менее, для оценки качества речи по ГОСТ Р 51061-97 принято использовать субъективные экспертные методы. Настоящий стандарт позволяет оценить пригодность низкоскоростных систем передачи речи для выхода в телефонную сеть общего пользования по критерию качества звучания передаваемой речи [3, 4]. Несмотря на свои недостатки, субъективный метод оценки качества передачи речи находит применение благодаря тому, что не требует сложных алгоритмов обработки, которые необходимы для получения объективных оценок, а также наибо-

лее приближен к реальной конечной цели – удовлетворенности пользователя качеством речевой связи. Поэтому в данном исследовании был использован метод экспертной оценки качества восстановления, описанный в ГОСТ Р 51061-97.

**Исследование и модернизация кодера MELP.** Экспериментальные исследования выполнены в программной среде MATLAB. В соответствии с ГОСТ Р 51061-97 было записано 10 различных фраз, произнесенных разными дикторами. Далее фразы кодировались исследуемыми кодерами, в частности LPC и MELP, после чего 15 человек, участвующих в роли экспертов, оценивали качество восстановления речи по пятибалльной шкале.

Исследование проводилось при нескольких скоростях кодирования для каждого из кодеров.

Введение битовой ошибки в различные поля кода позволило проанализировать помехоустойчивость кода и выявить специфику искажений, возникающих в восстановленном сигнале. На рисунке 2 показаны результаты экспертной оценки для кодеков LPC, MELP в зависимости от битовой скорости, а на рисунке 3 – от вероятности ошибки в канале, причем кривая 1 соответствует кодеру MELP, а кривая 2 – кодеру LPC.

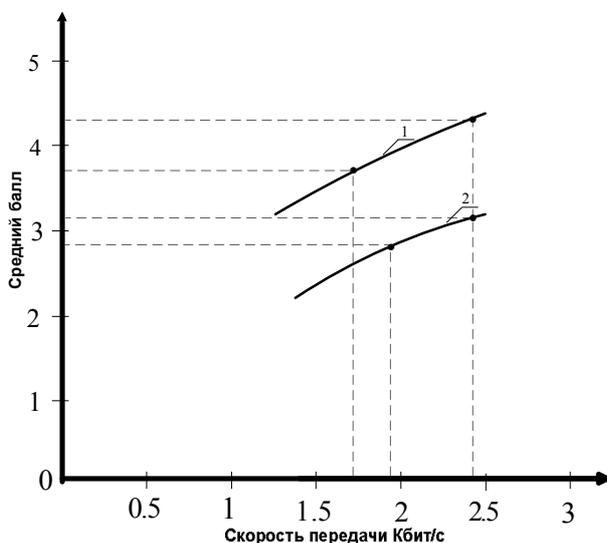


Рисунок 2 – Зависимость между качеством и скоростью передачи кодеров

На втором этапе вводилась ошибка в различные поля кода. Исследование показало, что декодеры LPC, CELP при невозможности восстановления битовых ошибок блокируют восстановление сигнала. В то время как декодер MELP блокирует восстановление только при обнаружении ошибки в периоде основного тона, а при ее появлении в других частях кадра продол-

жает восстановление с некоторой потерей качества.

Представленные на рисунке 3 кривые 1 и 2 являются зависимостями качества восстановления речи от вероятности ошибки в канале для кодеров MELP и LPC со скоростями 2.4 кбит/с.

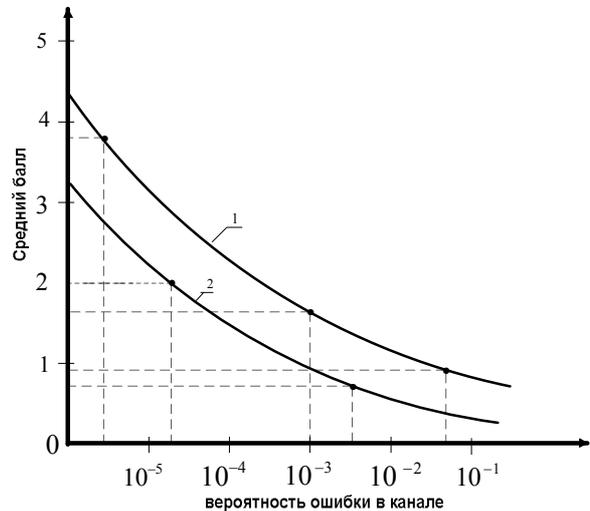


Рисунок 3 – Зависимость качества восстановления речи от вероятности ошибки в канале

Вследствие большей устойчивости кодера MELP и его низкой скорости он нашел применение в системах связи специального назначения. В то же время возможны его дальнейшее исследование и модернизация для улучшения помехозащищенности.

Исследования показали, что при возникновении ошибки в параметре Jitter MELP кода шум на выходе декодера возрастает, а также удаляется до 30 % всех вокализованных подкадров. Это проявилось в том, что воспроизведение сигнала на выходе стало очень быстрым и низкого качества, а при удалении всех вокализованных подкадров вместо речи формировался шум.

При введении ошибки в коэффициент усиления возрастает период молчания, обусловленный блокированием восстановления сигнала.

При значении порога обнаружения основного тона, равном 0.6 (установленное по умолчанию значение), средняя скорость кода составляет 2.4 кбит/с [5]. Если параметр порога увеличить более 0.6, то входной сигнал для большего количества кадров оценивается как невокализованный, скорость на выходе кодера снижается, а на выходе декодера формируется шум.

При введении ошибки в значения MSVQ, QFM и Vbp [6, 7] декодер блокируется и не восстанавливает сигнал, следовательно, при передаче эти параметры должны быть более защищенными за счет повышения избыточности при канальном кодировании.

Как известно, формирование сигнала возбуждения проходит в 4 этапа, на каждом из которых формируется адрес наилучшего вектора из десяти коэффициентов, хранящихся в кодовой таблице. Вектор, формируемый на каждом этапе, уменьшает величину ошибки кодирования. Таким образом, передаются четыре адреса векторов коэффициентов для формирования сигнала возбуждения MSVQ, на что отводится 25 бит. При увеличении порога чувствительности кодера до 0.75 скорость передачи составляет 1.7 кбит/с. Снижение скорости происходит в основном за счет того, что четвертый адрес вектора сигнала возбуждения (MSVQ 4) не формируется, поскольку при таком пороге практически не влияет на качество восстановления. При этом качество восстановления речи падает до величины 3.7 балла за счет снижения узнаваемости голоса, при сохранении смысловой разборчивости. Это отображено на рисунке 2.

При вероятности ошибки в канале 2 % в среднем на каждое кодовое слово MELP поражается один бит и при равновероятном распределении пораженного бита в кодовом слове смысловая разборчивость на выходе декодера полностью теряется. Защита всего кадра от однократной битовой ошибки подразумевает введение дополнительных проверочных бит, что повышает битовую скорость в канале, скорость модуляции и требует ряда изменений в системе передачи в целом. Модернизация системы передачи при сохранении стандартной скорости модуляции позволит снизить затраты на модернизацию оборудования.

Различные части кода в разной степени влияют на разборчивость речи, и повышение защищенности наиболее важных параметров кода должно обеспечить устойчивость кодера в целом. Поле периода основного тона (Qpitch) защищено от однократной ошибки применением кода Хемминга. Остальные части кода не подвергаются помехоустойчивому кодированию. Из них наибольший вклад в падение разборчивости дает ошибка в адресе сигнала возбуждения MSVQ 1. Как показал эксперимент, ошибка в остальных параметрах кода приводит к менее ощутимой потере качества. Кроме того, снижение качества восстановления за счет сокращения размера вектора MSVQ менее ощутимо, чем при наличии однократной битовой ошибки в MSVQ 1. Таким образом, применение совместного кодирования позволит динамически перераспределять битовый бюджет между информационной и проверочной частями кода в зависимости от оценки качества канала.

Дальнейшее исследование показало возможность модернизации кодера, заключающуюся в перераспределении 6 бит между адресом вектора многоуровневого квантования четвертого этапа MSVQ4 (в наименьшей степени влияющего на смысловую разборчивость речи) и проверочными битами помехоустойчивого кода для защиты вектора многоуровневого квантования первого этапа MSVQ1.

Таким образом, увеличив порог и сократив длину кода на 6 бит за счет устранения адреса последнего вектора коэффициентов, можно использовать освободившийся битовый бюджет для помехоустойчивого кодирования. Рекомендуется применить кодирование Хемминга (13,7) для этой части кода, что позволит сохранить допустимое качество восстановления речи при однократной ошибке в параметрах MSVQ1, QFM и Vbr кода MELP.

Тестирование модифицированного кодера проводилось в условиях вероятности битовой помехи 2 %. Выбор данной величины обусловлен тем, что при этом качество передачи речи с использованием кодера MELP, работающего со скоростью 2.4 кбит/с, составило около 1 балла (потеряна смысловая разборчивость, речь не восстанавливается), что полностью исключает возможность его использования в таких условиях. Специфика назначения данного кодера (средства специальной связи) предполагает его функционирование в сложной помеховой обстановке при необходимости сохранения в первую очередь смысловой разборчивости речи. Следовательно, исследование и модернизация кодера именно в предельном режиме функционирования представляют наибольший интерес.

Как показал эксперимент, после модернизации кодера MELP показатель качества восстановления составил 3.7 балла (сохраняется смысловая разборчивость, недостаточна узнаваемость диктора). Достигнутая после модернизации кодера величина показателя качества передачи речи в сложной помеховой обстановке позволяет расширить условия функционирования оборудования связи и повысить его тактико-технические характеристики. Естественно предположить, что при меньших ошибках в канале разборчивость речи и узнаваемость диктора улучшатся.

Следует отметить, что выполненные тесты, как и большинство других тестов по оценке качества речи в системах связи, выполнялись в несколько идеализированных условиях, в частности при отсутствии акустических шумов окружающей обстановки, поэтому в реальных усло-

виях результаты могут иметь некоторые отличия.

**Заключение.** Проведенные исследования показали, что перераспределение битового бюджета между информационной и проверочной частями кода MELP позволяет снизить потери в качестве восстановления речи при наличии ошибки в канале. Предложенная модернизация низкоскоростного кодера речи MELP для канала связи с малой полосой пропускания и высокой вероятностью ошибки позволяет существенно расширить условия функционирования системы связи, что, несомненно, актуально не только для средств специальной связи.

При технической реализации данного предложения необходимо установить порог переключения между режимами кодера (стандартный/модифицированный) в зависимости от вероятности ошибки в канале. Для исключения излишне частого переключения режимов работы необходимо обеспечить зону гистерезиса с двумя пороговыми значениями для переключения из стандартного режима в модифицированный и из модифицированного в стандартный. Конкретные величины порогов должны выбираться с учетом баланса между требованиями к разборчивости речи, узнаваемости диктора, вероятно-

сти ошибки и являются задачей дальнейших исследований.

#### **Библиографический список**

1. Wai C. CHU, Speech Coding Algorithms. Foundation and Evolution of Standardized Coders, 2003. – P. 552.
2. Клишин А.В. Проблемы объективной оценки показателей качества цифровых каналов для передачи речи, образованных в системах с непрозрачными элементами // Инженер. 2003. – № 4. – С. 108–111.
3. ГОСТ Р 51061 – 97 Системы низкоскоростной передачи речи по цифровым каналам. –М.: Изд-во стандартов, 1998.
4. Алдошина И.А. Субъективные и объективные методы оценки разборчивости речи. Часть 1 // Звуко-режиссер. 2002. – № 5. – С. 44–48.
5. Draft. Specifications for the Analog to Digital Conversion of Voice by 2.400 bit/second. Mixed Excitation Linear Prediction. 1998. – P. 7–9.
6. Leblanc W.P., Bhattacharya B., Mahmoud S.A., and Superman V. Efficient Search and Design Procedures for Robust Multi-Stage VQ of LPC Parameters for 4 kb/s Speech Coding / IEEE Transaction on Speech and Audio Processing, Vol.1, No.4, October 1993. –P. 373–385.
7. McCree A.V. and Barnwell III T.P., A Mixed Excitation LPC Vocoder Model for Low Bit Rate Speech Coding / IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, Vol. 3, No. 4, July 1995. – P. 242–250.

УДК 681.586+621.317

**И.Е. Сырмолов**

## **РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Проведены исследования чувствительности датчиков на поверхностных акустических волнах (ПАВ) при нагружении упругого элемента (УЭ) сосредоточенной силой, направленной по нормали к поверхности с встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) ПАВ. Предложен алгоритм расчета локального напряженно-деформированного состояния УЭ. Выявлена зависимость величины составляющих механических напряжений от координат точек в области контакта и радиуса круговой площадки, который, в свою очередь, зависит от величины приложенной силы. Продемонстрированы результаты экспериментов по исследованию УЭ и датчиков силы на ПАВ-линиях задержки.*

**Ключевые слова:** датчики ПАВ, ПАВ-генератор, датчик силы, напряженно-деформированное состояние, механические напряжения.

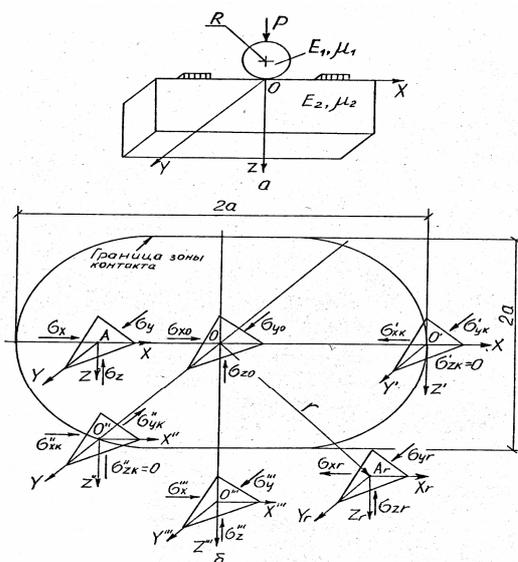
**Введение.** Пьезоэлектрические датчики, являющиеся составной частью цифровой аппаратуры, используются в настоящее время в приборах стационарного типа, в полевых условиях, в лабораторных установках. В 60-е годы прошлого века в технике появились твердотельные элек-

тронные устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в диапазоне частот 10–1000 МГц. Современные методы литографии позволяют создавать ПАВ-устройства, в том числе и датчики, с рабочими частотами до нескольких гигагерц. Это позволяет передавать

запросный сигнал и получать информацию по радиоканалу.

**Цель работы** – исследовать чувствительность датчиков ПАВ при нагружении упругого элемента (УЭ) сосредоточенной силой, направленной по нормали к поверхности с ВПШ ПАВ, произвести расчет локально-деформированного состояния УЭ, выявить, от каких параметров зависит величина составляющих механических напряжений.

**Теоретические исследования.** При нагружении плоской поверхности, в которой распространяются ПАВ, вертикально приложенной силой, действующей через сферическое тело (рисунок 1), возникает сложное напряженно-деформированное состояние. Параметрами, характеризующими величину напряжений деформаций и перемещений по трем координатам локального объема, являются: размеры и форма поверхности контакта, компоненты нормальных и касательных механических неоднородных напряжений на поверхности, границах и в центре области контакта, а также на некоторой глубине от поверхности в зоне контакта.



**Рисунок 1 – Поля механических напряжений на поверхности и в объеме при локальном нагружении тензоэлемента с линией задержки ПАВ: а – схема нагружения; б – распределение компонентов напряжений**

Тензочувствительность скорости ПАВ ко всем компонентам объемного локального напряженного состояния будет отличаться от случая плоского напряженного состояния, в котором отсутствует составляющая напряжения, приложенного по нормали к поверхности. Кроме того, в зоне контакта могут возникать более

сложные явления отражения, трансформации типов волн, количественная характеристика которых требует особого рассмотрения. В том случае, когда сферическое тело, через которое приложена внешняя нагрузка, выполнено из такого же материала, что и подложка, отражением и трансформацией волн на границах и зоне контакта пренебрегаем.

Вид механических напряжений и их величина в произвольной точке нагруженной области позволяют определить дополнительную относительную деформацию в направлении распространения ПАВ в пределах локализации ее энергии по глубине и апертуре и тензочувствительность фазовой скорости к продольным и поперечным относительно вектора фазовой скорости ПАВ компонентам нормальных напряжений в плоскости и на некоторой глубине.

Кроме того, необходимо знать коэффициенты тензочувствительности фазовой скорости к сдвиговым напряжениям в плоскостях, параллельных основной, и к вертикальным компонентам нормальных и сдвиговых напряжений. Суммарный эффект определяется величиной относительной деформации в направлении распространения ПАВ, которая является мерой изменения длины акустического пути, и суммой произведений коэффициентов тензочувствительности и соответствующей величины нормальных сдвиговых напряжений:

$$\delta T_3 = \frac{1}{lWH_{\text{эф}}} = \left[ \frac{l}{2} \frac{W}{2} \frac{H_{\text{эф}}}{0} \int \int \int \varepsilon_x(x, y, z) dx dy dz - \frac{l}{2} \frac{W}{2} \frac{H_{\text{эф}}}{0} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 K_{\sigma_{ij}} \sigma_{ij}(x, y, z) dx dy dz \right] \quad (1)$$

где  $\delta T_3$  – относительное изменение времени задержки при локальном нагружении;  $l$  – длина акустического пути;  $W$  – апертура;  $H_{\text{эф}}$  – эффективная глубина локализации «средней» энергии ПАВ;  $\varepsilon_x(x, y, z)$  – деформация в направлении распространения ПАВ некоторой точки зоны контакта с координатами  $x, y, z$ ;  $K_{\sigma_{ij}}$  – коэффициенты тензочувствительности фазовой скорости ПАВ;  $\sigma_{ij}(x, y, z)$  – компоненты напряжения в точке с координатами  $x, y, z$  по трем направлениям.

На рисунке 1, б показаны компоненты нормальных механических напряжений в области контакта в характерных точках.

Для произвольной точки площадки контакта с координатами  $x, y$  нормальные компоненты напряженного состояния представим в виде:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{xy} \frac{y^2}{x^2+y^2} + \sigma_{xx} \frac{x^2}{x^2+y^2} \\ \sigma_y &= \sigma_{yy} \frac{y^2}{x^2+y^2} + \sigma_{yx} \frac{x^2}{x^2+y^2} \\ \sigma_z &= \sigma_{zy} \frac{y^2}{x^2+y^2} + \sigma_{zx} \frac{x^2}{x^2+y^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для плоскости XOY (рисунок 1) в произвольной точке (кроме центра) области контакта:

$$\sigma_x = -P_0 \left\{ \frac{1-2\mu}{3} \cdot \frac{a^2}{x^2+y^2} \left[ \sqrt{\left(1-\frac{y^2}{a^2}\right)^3} - \sqrt{\left(1-\frac{x^2}{a^2}\right)^3} \right] - \right. \quad (3)$$

$$\left. - \frac{xy}{x^2+y^2} \left[ 2\mu \frac{y}{x} \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} + \frac{x}{y} \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \right] \right\},$$

$$\sigma_y = -P_0 \left\{ \frac{1-2\mu}{3} \cdot \frac{a^2}{x^2+y^2} \left[ \sqrt{\left(1+\frac{y^2}{a^2}\right)^3} - \sqrt{\left(1-\frac{x^2}{a^2}\right)^3} \right] - \right. \quad (4)$$

$$\left. - \frac{xy}{x^2+y^2} \left[ \frac{y}{x} \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} + 2\mu \frac{x}{y} \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \right] \right\},$$

$$\sigma_z = -P_0 \left[ \frac{xy}{x^2+y^2} \left( \frac{y}{x} \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} + \frac{x}{y} \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \right) \right], \quad (5)$$

где  $P_0$  – распределенное давление в центре площадки контакта.

Частные случаи: в точках с координатами  $x = 0, y = a$  и  $x = a, y = 0$ :

$$\sigma_x = -P_0 \frac{1-2\mu}{3}, \quad \sigma_y = -P_0 \frac{1-2\mu}{3}, \quad \sigma_z = 0;$$

в точках с координатами  $x = y$ :

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_y &= -0.5P_0 \left[ \sqrt{1-x^2/a^2} (1+2\mu) \right], \\ \sigma_z &= -P_0 \sqrt{1-x^2/a^2}. \end{aligned}$$

Компоненты напряженного состояния в плоскости находим аналогичным образом:

$$\begin{aligned} \sigma_x = -P_0 \frac{zy}{y^2+z^2} \left\{ \frac{1-2\mu}{3} \cdot \frac{a^2}{zy} \left[ 1 - \sqrt{\left(1-\frac{y^2}{a^2}\right)^3} \right] + \right. \\ \left. + 2\mu \frac{y}{z} \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

$$+ (1+\mu) \frac{z}{y} \left[ 1 - \frac{z}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{z} - \frac{1}{2} \frac{a^2}{a^2+z^2} \right] \Bigg\},$$

$$\begin{aligned} \sigma_y = -P_0 \frac{zy}{y^2+z^2} \left\{ \frac{1-2\mu}{3} \cdot \frac{a^2}{zy} \left[ 1 - \sqrt{\left(1-\frac{y^2}{a^2}\right)^3} \right] + \right. \\ \left. + \frac{y}{z} \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

$$+ (1+\mu) \frac{z}{y} \left[ 1 - \frac{z}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{z} - \frac{1}{2} \frac{a^2}{a^2+z^2} \right] \Bigg\},$$

$$\sigma_z = -P_0 \frac{zy}{y^2+z^2} \left( \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} \frac{y}{z} + \frac{a^2}{a^2+z^2} \frac{z}{y} \right). \quad (8)$$

Значения напряжений в некоторых точках представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Значения вертикальной составляющей механических напряжений**

$y$	$a$	$a$	$a$	$a$
$z$	$0,5a$	$a$	$2a$	$4a$
$\sigma_z$	$-0,16 P_0$	$-0,25 P_0$	$-0,16 P_0$	$-0,05 P_0$

Для общего случая компоненты напряженного состояния для произвольной точки (кроме точки O) равны:

$$\begin{aligned} \sigma_x = P_0 \left\{ \frac{1-2\mu}{3} \frac{a^2}{x^2+y^2} \left[ \sqrt{\left(1-\frac{y^2}{a^2}\right)^3} - \sqrt{\left(1-\frac{x^2}{a^2}\right)^3} \right] - \right. \\ \left. - \frac{xy}{x^2+y^2} \left[ 2\mu \frac{y}{x} \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} + \frac{x}{y} \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \right] \right\} \frac{x^2+y^2}{x^2+y^2+z^2} - \\ - \left\{ (1+\mu) \left[ 1 - \frac{z}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{z} \right] - \frac{1}{2} \frac{a^2}{a^2+z^2} \right\} \frac{z^2}{x^2+y^2+z^2}, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_y = P_0 \left\{ \frac{1-2\mu}{3} \frac{a^2}{x^2+y^2} \left[ \sqrt{\left(1-\frac{x^2}{a^2}\right)^3} - \sqrt{\left(1-\frac{y^2}{a^2}\right)^3} \right] - \right. \\ \left. - \frac{xy}{x^2+y^2} \left[ \frac{y}{x} \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} + 2\mu \frac{x}{y} \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \right] \right\} \frac{x^2+y^2}{x^2+y^2+z^2} - \\ - \left\{ (1+\mu) \left[ 1 - \frac{z}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{z} \right] - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \frac{a^2}{a^2+z^2} \right\} \frac{z^2}{x^2+y^2+z^2}, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_z = -P_0 \left\{ \left[ \frac{xy}{x^2+y^2} \left( \frac{y}{x} \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} + \frac{x}{y} \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \right) \right] \frac{x^2+y^2}{x^2+y^2+z^2} + \right. \\ \left. + \frac{a^2 z^2}{(a^2+z^2)(x^2+y^2+z^2)} \right\}. \quad (11) \end{aligned}$$

Деформация в произвольной точке нагруженной области (за исключением центра контакта) определяется формулами:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)}{E}, \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)}{E}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)}{E}. \end{aligned} \quad (12)$$

Частные случаи: в центре площадки соприкосновения  $\sigma_z = -P_0$ :

$$\sigma_x = \sigma_y = -P_0 \frac{1+2\mu}{3}; \quad \varepsilon_x = -\frac{P_0}{E} \left( \frac{1-\mu-2\mu^2}{2} \right);$$

$$P_0 = -\frac{3}{2} \frac{P}{\pi a^2}, \text{ на границе контакта (по оси X)}$$

$$\sigma_z = 0, \quad \sigma_x = \sigma_y = P_0 \frac{1-2\mu}{3}.$$

В таблице 2 представлены результаты расчета деформаций в продольном и поперечном направлениях площадки контакта.

Таблица 2 – Деформация площадки контакта

y	0	±a	0
y	0	0	±a
ε <sub>x</sub>	-0,26 $\frac{P_0}{E}$	-0,17 $\frac{P_0}{E}$	+0,17 $\frac{P_0}{E}$
ε <sub>y</sub>	-0,26 $\frac{P_0}{E}$	+0,17 $\frac{P_0}{E}$	-0,17 $\frac{P_0}{E}$

Для произвольной точки площадки соприкосновения деформация определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{P_0}{E} \frac{a^2}{x^2 + y^2} \left\{ \frac{1-\mu-2\mu^2}{3} \sqrt{\left(1-\frac{y^2}{a^2}\right)^3} - \sqrt{\left(1-\frac{x^2}{a^2}\right)^3} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2xy}{a^2} \left[ (1-\mu^2) \frac{x}{y} \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} + 2\mu \frac{y}{x} \sqrt{1-\frac{y^2}{a^2}} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Расчеты, проведенные по формуле, нормированные для  $\varepsilon_0 = P_0/E$ , представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения деформации в точках площадки контакта в данном направлении вдоль диагоналей

xy	0,2a	0,3a	0,4a	0,5a	0,6a	0,7a
$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$	-1,48	-1,44	-1,38	-1,31	-1,29	-1,08

Радиус круговой площадки согласно работе

[1] определяем по формуле для пластины и шара, выполненных из одного материала:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \frac{1-\mu^2}{E} RP}, \quad (14)$$

где R – радиус шара, E – модуль Юнга.

В случае соприкосновения двух разнородных тел:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{PR_1R_2}{R_1+R_2} \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}. \quad (15)$$

Для контакта шар-плоскость  $R \rightarrow \infty$ , тогда:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} PR_1 \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}. \quad (16)$$

**Результаты экспериментальных исследований.**

Датчик силы (рисунок 2) состоит из неподвижной с ВШП, установленной на металлическом плоском основании. Нагруженное сферическое тело контактирует с рабочей поверхностью пластины. Локальные механические напряжения в пластине в зоне контакта изменяют время задержки сигнала ПАВ пропорционально силе за счет изменения длины пути (L) и скорости (V) волны:

$$T_0 \pm \Delta T = (L + \Delta L) \frac{1}{V \mp \Delta V}. \quad (17)$$

Уменьшение поперечных составляющих силы осуществляется за счет отсутствия изгибных деформаций, так как пластина установлена всей плоскостью на жестком плоском основании, а нагружение рабочей поверхности осуществляется через сферическое тело (шар).

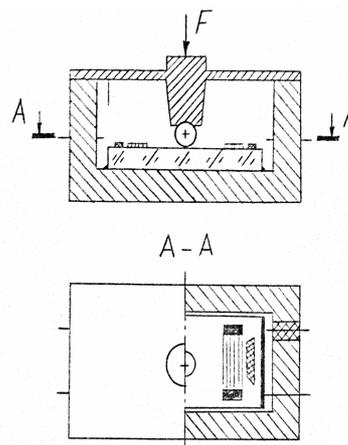


Рисунок 2 – Датчик силы на линии задержки ПАВ с локальным нагружением УЧЭ

При нагружении опертого по контуру диска сосредоточенной в центре силой происходит изменение частоты ПАВ-генератора (рисунок 3). Направление распространения ПАВ, определяемое положением ВШП, и размер активной области влияют на величину силовой чувствительности. Для диска диаметром 25 мм и толщиной

1 мм силовая чувствительность достигает 3 Гц/г (прямая 4 на рисунке 3). Достоинство данного способа нагружения – малая чувствительность к поперечным составляющим измеряемой силы.

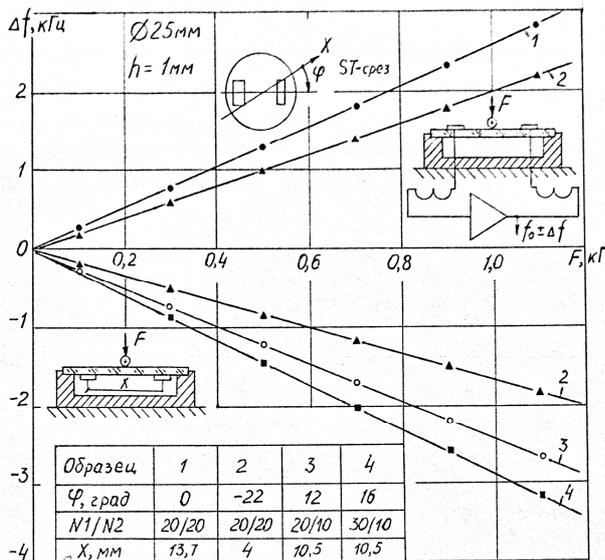


Рисунок 3 – Измерение частоты ПАВ-генератора с мембранным тензоэлементом, нагруженным в центре сосредоточенной силой

Значительно меньшей силовой чувствительностью, но большей жесткостью отличается локальный способ нагружения УЧЭ (рисунок 4).

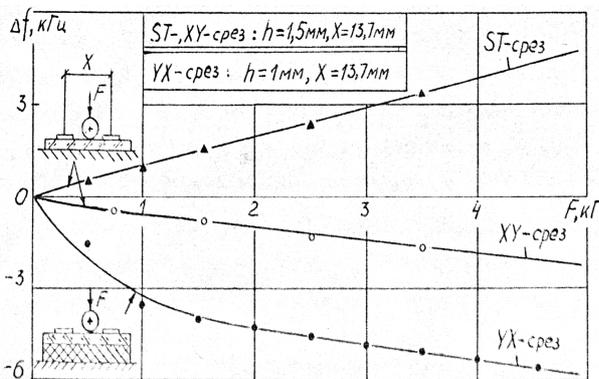


Рисунок 4 – Изменение частоты ПАВ-генератора при локальном нагружении

Силовая чувствительность определяется срезом кристалла, диаметром шарика, расстоянием между ВШП и частотой акустического синхрониз-

ма. В отличие от изгибного нагружения  $yx$  – срез кварца дает противоположную по знаку силовую чувствительность. Материал в центре поверхности соприкосновения удерживается от поперечного расширения, находится в состоянии сжатия со всех сторон и способен выдерживать высокие давления без разрушения.

**Выводы.** При нагружении УЭ сосредоточенной силой, направленной по нормали к поверхности с ВШП ПАВ, возникает сложное пространственное деформированное состояние. Величина составляющих механических напряжений определяется координатами точек в области контакта, радиусом круговой площадки, который, в свою очередь, зависит от величины приложенной силы.

Поэтому возникает нелинейность упругой характеристики, а чувствительность датчиков на ПАВ с таким УЭ невелика из-за малых размеров площадки контакта, в пределах которой наблюдаются максимальные деформации поверхностного слоя. Для увеличения чувствительности следует уменьшать апертуру ВШП, расстояние между ними и увеличивать радиус сферического или цилиндрического тела, через которое осуществляется нагружение УЭ.

**Заключение.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют разработать датчики давлений и силы с локальным приложением нагрузки. Некоторые конструкции устройств защищены авторскими свидетельствами [2–5].

#### Библиографический список.

1. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки/ С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер – М.: Наука, 1966. – 420 с.
2. Авт. свид. №922556 (СССР). Датчик разности давлений/ И.Е. Сырмолотнов и др. Заявл. 1.12.1980 г.
3. Авт. свид. №938069 (СССР) Датчик усилий/ И.Е. Сырмолотнов. Заявл. 4.12.1980 г.
4. Авт. свид. №951089 (СССР). Датчик давлений/ И.Е. Сырмолотнов и др. Заявл. 8.07.1980 г.
5. Авт. свид. №1161881 (СССР). Акселерометр с преобразователем поверхностно-акустических волн/ И.Е. Сырмолотнов. Заявл. 12.08.1983 г.

УДК 621.318.8

*Ю.В. Черкасова, А.С. Иваников*

## ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДПРОБОЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ КОММУТАЦИИ В ВАКУУМНЫХ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТАХ

*Разработана схема проведения испытаний на электрическую прочность. Рассмотрены результаты исследования предпробойных явлений в процессе коммутации в вакуумных магнитоуправляемых контактах.*

**Ключевые слова:** электрическая прочность, вакуумный магнитоуправляемый контакт, автоэлектронная эмиссия, предпробойный ток, микровыступ, электрический пробой.

**Введение.** Электрический пробой – кратковременное нарушение вакуумной изоляции высоковольтных электронных приборов.

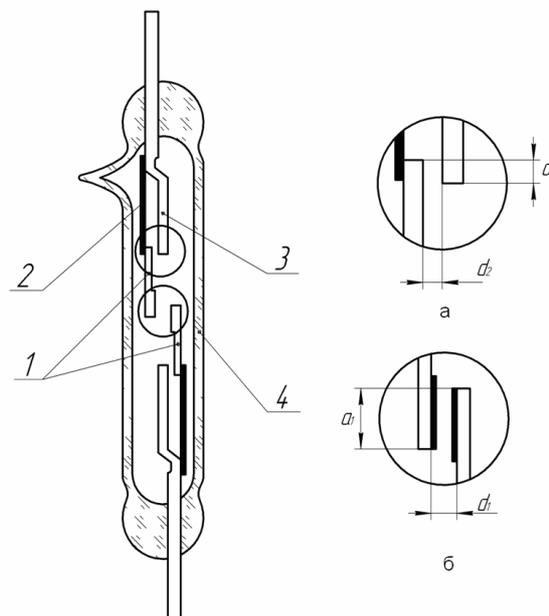
Механизм развития электрических пробоев в разных условиях изучен и исследован довольно хорошо для статического положения электродов [1]. Однако наличие токоограничительных резисторов с большим сопротивлением исключает поддержку источником питания разрядного тока, оказывает определенное специфическое влияние на механизм возникновения и протекания электрических пробоев. Данное условие присуще и слаботочным вакуумным высоковольтным коммутирующим устройствам, в том числе и вакуумным магнитоуправляемым контактам (ВВМК). Еще одной характерной особенностью магнитоуправляемых контактов является подвижность электродной системы, так как в таких устройствах сами электроды изготовлены из ферромагнитного материала (пермаллоя), одновременно выполняют функцию магнитоприводов и непосредственно электрических контактов. Таким образом, и возникновение предпробойного тока, и развитие электрического пробоя происходит при непрерывном временном изменении межэлектродного расстояния с ростом напряженности электрического поля.

Основными источниками, поддерживающими электрический пробой, определяющими энергию и степень воздействия на поверхность электродов, являются суммарная паразитная емкость системы (схемы) коммутации и изменяющаяся динамическая емкость самих электродов.

**Целью данной работы** являются изучение и оценка механизма развития электрических пробоев в процессе коммутации цепей высокого напряжения.

**Экспериментальные исследования меха-**

**низма развития пробоя.** В качестве экспериментальных приборов с подвижной системой электродов использовался вакуумный высоковольтный магнитоуправляемый контакт (ВВМК), конструкция которого создана на базе мелкосерийного контакта типа МКА-5214 и представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Конструкция экспериментального вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта:**

**1 – подвижный электрод; 2 – пружина; 3 – неподвижный электрод; 4 – баллон**

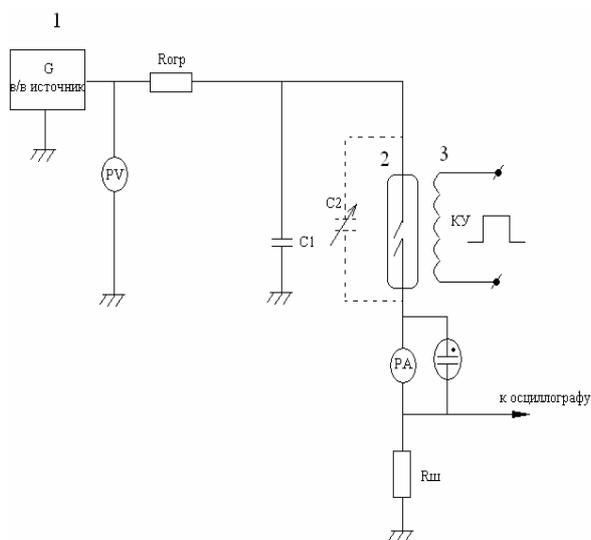
Конструкция таких приборов состоит из двух контакт-деталей, изготовленных из магнитного материала (Н-52, пермаллой) и впаянных в стеклянную колбу. На неподвижные электроды смонтирована подвижная контактная группа в виде пружины из немагнитного материала – 2 и подвижного электрода – 1. В приборе создается

вакуум с давлением  $1 \cdot 10^{-3}$  Па. Контакт-детали, электроды выполняют одновременно две функции: элементов коммутации и токопровода и элементов привода с помощью магнитного поля, создаваемого катушкой – соленоидом. На контактирующие участки подвижных электродов наносилось разными методами покрытие из тугоплавких металлов – вольфрама, молибдена толщиной  $\geq 15$  мкм. Контакт-детали установлены с зазорами, обеспечивающими необходимую электрическую изоляцию, электрическую прочность. Конструкция, представленная на рисунке 1, б, позволяет за счет перераспределения магнитного тока по трем зазорам и уменьшения жесткости пружин увеличивать центральный электрический зазор и существенно повысить рабочее напряжение до 15 кВ [1].

Это особенно важно в связи с тем, что интенсивность предпробойных явлений сильно зависит от величины испытательного напряжения, уровня которого, в простой консольной конструкции, не представляется возможным достичь.

Величина перекрытия в зазорах выбиралась из условия минимума МДС срабатывания, уменьшения чувствительности к электрическому воздействию и обеспечения электропрочности. Данные величины обеспечивались предустановкой в процессе сборки контактных узлов и взаимного расположения в колбе в момент герметизации – заварки контакт-деталей в стекло.

Схема проведения испытаний на электрическую прочность, исследования предпробойных явлений в процессе коммутации приведена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Схема проведения испытаний на электрическую прочность: 1 – источник питания; 2 – экспериментальный прибор; 3 – катушка управления**

Она содержит источник питания – 1, экспериментальный высоковольтный геркон – 2, схемы измерения тока и напряжения PV, PA, запоминающего осциллографа, катушки управления – 3.

Контактные поверхности после испытаний на электрическую прочность и воздействия высокого напряжения при значениях меньше напряжения пробоя тщательно исследовались на оптическом и атомно-силовом микроскопах с целью оценки влияния параметров покрытия на характер предпробойных токов и токов, возникающих в момент замыкания контактов. Токи контролировались с помощью микроамперметров типа М-95 с нижним пределом измерения 0,01 мА в статическом состоянии и с помощью осциллограмм тока при разовом включении, полученных запоминающими осциллографами типа С1-13, С1-15. Схема измерения и наблюдения импульсов тока была синхронизирована с генератором управляющих импульсов и позволяла изменять время задержки запуска развертки осциллографа.

В качестве источника высокого напряжения использовался промышленный блок «Ирис-1» с пульсацией напряжения не более 2 %, в качестве ограничительного резистора использовались безиндуктивные резисторы типа КЭВ-5 с номиналом от 1 до 10 МОм. Для защиты измерительного прибора М-95 от воздействия больших импульсных токов в момент электрического пробоя применялся газоразрядный индикатор типа МТХ-90.

Результаты экспериментальных исследований были использованы при создании программы расчетов плотности токов АЭЭ, динамической напряженности электрического поля в момент коммутации, моделирования процесса изменения тока АЭЭ в динамике с целью оценки влияния предпробойных явлений на возникновение электрических пробоев [3].

Ранее установлено, что электрические пробои вызывают электрическую эрозию контактирующей поверхности (разрушение), отвечающую за срок службы ВВМК, пробивное напряжение, переходное сопротивление и другие параметры контактов (коммутаторов) [2].

**Анализ экспериментальных данных по исследованию предпробойных явлений в момент коммутации и электрической прочности.** Все готовые ВВМК подвергались испытанию на электрическую прочность, которая оценивалась по определенному количеству пробоев в виде кратковременных импульсов тока большой амплитуды при напряжениях в 1,5 раза выше рабочих, номинальных. Эти испытания пока-

зали, что еще до возникновения электрических пробоев в межконтактном зазоре протекает нестабильный по времени и амплитуде ток. На рисунке 3 приведены графики изменения предпробойного тока для двух значений постоянного напряжения при выдержке в течение 1 часа.

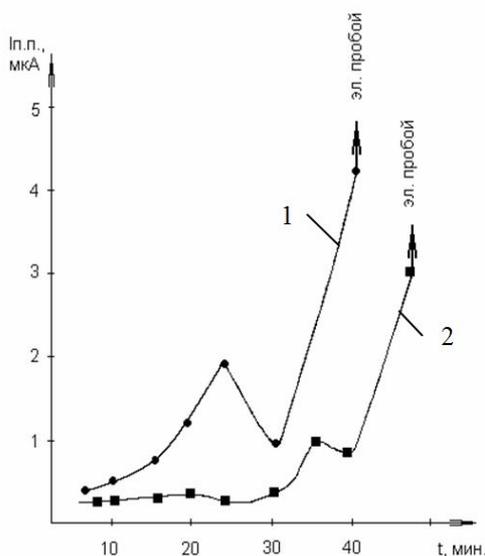


Рисунок 3 – Графики изменения предпробойного тока при выдержке под напряжением:  
1 –  $U=15$  кВ; 2 –  $U=12,5$  кВ

Ток нестабилен, и при увеличении до значений 4÷5 мкА происходит лавинообразное его нарастание, и счетное устройство, включенное в цепь МК, регистрирует импульс тока – электрической пробой. После прохождения пробоя ток уменьшается, иногда до нулевого значения.

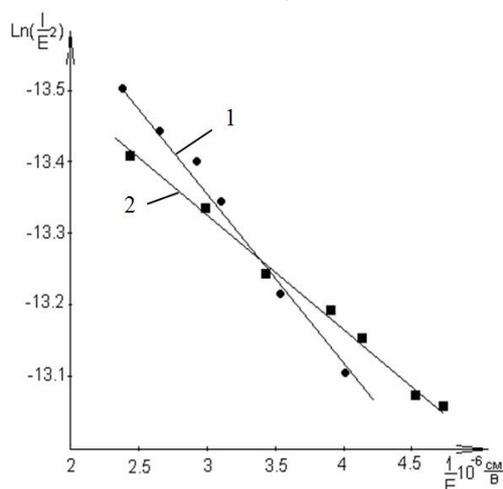


Рисунок 4 – Вольт-амперная характеристика предпробойного тока:  
1 – первичная; 2 – повторное испытание

Снятые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и построенные в координатах Фаулера - Нортгейма показали, что предпробойный ток представляет собой автоэлектронную эмиссию (АЭЭ) с микровыступов на контактом покрытии. Причем снятая ВАХ после электрического пробоя имеет больший угол наклона, и эмиссия начинается при больших значениях напряжения на электродах (рисунок 4), что, очевидно, связано либо с исчезновением эмитирующего микровыступа, либо с изменением его геометрических размеров.

В принципе возникновение АЭЭ в статическом состоянии МК, ее изменение в процессе выдержки под напряжением, изменение наклона ВАХ полностью укладывается в рамки теории катодного механизма развития электрических пробоев, в которых инициатором этих пробоев является АЭЭ с микровыступов [1], острый на катоде с последующим его разогревом, плавлением, испарением и развитием микроаризада в парах материала катода. То есть в этом случае разрушается и подвергается электрической эрозии поверхность катода.

Но в случае коммутации цепи высокого напряжения при быстром перемещении электродов под действием магнитного поля очень сложно найти, оценить факторы, определяющие появление и развитие разрядных явлений в момент замыкания (коммутации). Как установлено в работе [2], преимущественно эрозии подвергается поверхность анода и именно степень этой эрозии определяет ресурс работы МК.

**Заключение.** Полученные результаты имеют фактическое значение для производства ВВМК, так как непрерывное совершенствование изделий, их характеристик и технологий изготовления является, при современном уровне конкуренции, одним из основных условий успешной производственной деятельности.

#### Библиографический список

1. Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. – М.: Атомиздат, 1972. – 304 с.
2. Латан Р. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения: пер. с англ./ под ред. Г.С. Белкина. – М.: Энергоатомиздат., 1985.–192 с.
3. Черкасова Ю.В., Иваников А.С. Исследование механизма развития пробоя в вакуумных магнитоуправляемых контактах // Вестник РГРТУ. №3 (выпуск 25). – Рязань, 2008.