

**БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ**

Немирко А. П., Саламонова И. С. Электрическая модель системы внешнего дыхания при искусственной вентиляции лёгких ..... 83

Тихонов Э. П. Алгоритм фильтрации ЭКГ с временной дискретизацией высокого разрешения. Общий анализ ..... 89

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ**

Антропова М. А., Червинская К. Р. Анализ деятельности специалистов по человеко-компьютерному взаимодействию российских организациях ..... 96

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ИННОВАЦИОННЫЙ И АНТИКРИЗИСНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ**

Кадиев И. Г., Мардас Д. А. Управление инвестиционно-инновационным портфелем крупного предприятия (корпорации) ..... 105

Гуськова М. В. Моделирование в образовательной эвалуации ..... 111

**ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ**

Калашиников В. В. Аграрная реформа П. А. Столыпина: сущность, потенциал, альтернативы ..... 117

Стогов Д. И. Реформы П. А. Столыпина и современность ..... 123

Сведения об авторах ..... 130

Правила представления рукописей авторами ..... 134

**Учредитель:**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)»  
197376, Санкт-Петербург,  
ул. Проф. Попова, 5  
Тел.: (812) 346-44-87  
Факс: (812) 346-27-58

**Свидетельство о регистрации**

ПИ № ФС2-8390  
от 04.12.2006 г. выдано  
Управлением Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу

\* \* \*

**Редакторы:**

Э. К. Долгатов, Н. В. Лукина,  
Т. А. Лунаева, И. Г. Скачек

**Комп. верстка:**

Е. Н. Паздниковой, А. И. Рыбца,  
М. В. Егоровой, А. А. Веселова

Подписано в печать 13.06.12.

Формат 60 × 84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура "Times New Roman".

Печ. л. 17,0

Тираж 300 экз. (1-й завод 1–120 экз.)

Заказ 63.

**Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ"**

197376, Санкт-Петербург,

ул. Проф. Попова, 5

Тел.: (812) 346-45-23

Факс: (812) 346-28-56

**ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 45821 ПО ОБЪЕДИНЕННОМУ КАТАЛОГУ  
"ПРЕССА РОССИИ". ТОМ 1 "ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ"**

Подписка производится в любом почтовом отделении России

*Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)*



УДК 621.396.969.11

Д. В. Гайворонский, О. А. Дмитриева

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ СИГНАЛА С МЕАНДРОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

*Модернизация спутниковых радионавигационных систем предполагает расширение номенклатуры сигналов, передаваемых космическими аппаратами. Предполагается расщепление спектра с помощью модуляции типа ВОС как перспективный путь обеспечения высокой точности позиционирования при сохранении внутрисистемной электромагнитной совместимости новых сигналов с существующими. Показаны различные сценарии помеховой обстановки в точке приема, где лучшими оказываются те или иные представители модуляции ВОС.*

**Спутниковая радионавигационная система, дальномерный код, чип, меандровая модуляция, корреляционная функция**

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) нашли широкое распространение в современном индустриальном мире, поскольку они удовлетворяют потребности широкого круга потребителей во всепогодном координатно-временном обеспечении в любой точке земного шара. Однако с ростом числа потребителей услуг СРНС перед разработчиками была поставлена задача повышения качественных показателей системы, что невозможно без усовершенствования приемной и передающей аппаратуры, атомных стандартов частоты и формируемых космическими аппаратами (КА) дальномерных кодов. Одним из таких ключевых направлений модернизации космического сегмента является совершенствование пользовательского радиointерфейса, т. е. сигналов, излучаемых КА.

В системах GPS и Galileo, где этап модернизации уже завершен, одним из средств повышения точностных показателей при использовании выделенного частотного диапазона служит расширяющая или ВОС- (binary offset carrier) модуляция, призванная, ко всему прочему, обеспечивать лучшую устойчивость к преднамеренным и естественным помехам. Принцип формирования каждого элемента (чипа) дальномерного кода сводится к замене существующего элемента, имеющего прямоугольную форму, отрезком меандрового колебания той же длительности.

Задачей статьи является сравнение потенциальной точности измерения задержки сигналов КА в аппаратуре потребителя для разных форматов ВОС-модуляции с широко применяемыми в СРНС чипами прямоугольной формы.

Материал статьи разбит на несколько частей: в первой рассматривается алгоритм формирования и классификация ВОС-сигналов, а также их спектральные свойства. Затем приводится упрощенная модель одного канала навигационного приемника сигнала СРНС, после – аналитические соотношения, характеризующие потенциальную точность измерения запаздывания сигнала, а также результаты компьютерного моделирования, охватывающего весь спектр сценариев помеховой обстановки в зоне приема. Итогом статьи являются выводы о перспективах применения расширяющей модуляции в новом поколении радиointерфейса, а также рекомендации по ее использованию.

**ВОС-сигнал.** В современной литературе по спутниковой навигации общепринята символика, включающая в обозначение параметров модуляции ВОС:  $\text{ВОС}(f_m, f_c)$ ,  $\text{ВОС}(n_m, n_c)$ . В первом случае  $f_m$  и  $f_c$  – соответственно частоты меандра и следования чипов, во втором  $n_m$  и  $n_c$  выражают те же частоты через их кратность некоторой условной опорной частоте  $f_r$ :  $n_m = f_m/f_r$ ,  $n_c = f_c/f_r$ . В интерфейсных документах GPS [1] за опорную принята частота  $f_r = 1,023$  МГц. Так как параметр  $n_c$  влияет только на полную длительность чипа  $\Delta$ , далее достаточно ограничиться лишь его значением  $n_c = 1$ , т. е. анализом модуляции типа  $\text{ВОС}(n_m, 1)$ .

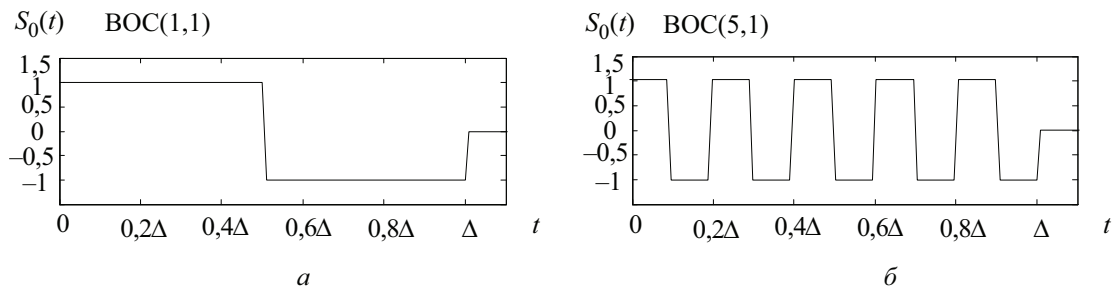


Рис.1

Общую модель сигнала  $k$ -го КА можно представить в виде суммы:

$$\dot{S}_k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_{k,i} S_0(t - i\Delta), \quad (1)$$

где  $k = 1, 2, \dots, M$ ,  $M$  – общее количество КА в группировке;  $a_{k,i}$  – закон модуляции дальномерного кода;  $S_0(t)$  – элемент кода;  $\Delta$  – длительности чипа.

Очевидно, что эта модель распространяется и на формат ВОС, для чего в ней в роли чипа  $S_0(t)$  следует использовать не прямоугольник, а соответствующий отрезок меандра. Пусть  $u_0(t)$  обозначает прямоугольный «микрочип», длительность которого  $\Delta_0$  в  $2n_m$  раз меньше длительности чипа:  $\Delta_0 = \Delta/2n_m$ . Тогда для прямоугольного сигнала в (1) в роли  $S_0(t)$  должен фигурировать чип

$$S_0(t) = \sum_{i=0}^{2n_m-1} u_0(t - i\Delta_0), \quad (2)$$

а для сигнала формата ВОС( $n_m, 1$ ) –

$$s_0(t) = \sum_{i=0}^{2n_m-1} (-1)^i u_0(t - i\Delta_0). \quad (3)$$

Для наглядного пояснения выражения (3) на рис. 1 приведены формы одного чипа дальномерного кода с меандровой модуляцией формата ВОС(1,1) (а) и ВОС(5,1) (б) длительностью  $\Delta$ .

К пропагандируемым достоинствам ВОС-сигналов относятся обеспечение более высокой точности за счет сужения пика АКФ по сравнению с чипом прямоугольной формы, а также эффективность использования выделенного системе частотного ресурса, связанная с возможностью передачи существующих сигналов в провалах ВОС-модулированного спектра. Выражение для энергетического спектра модуляции ВОС описывается выражением, взятым, например, из [2]:

$$|\tilde{s}_0(f)|^2 = \Delta_0^2 \left( \frac{\sin \pi f \Delta_0}{\pi f \Delta_0} \right)^2 \frac{\sin^2 \pi f \Delta}{\cos^2 \pi f \Delta_0} = \Delta^2 \left( \frac{\sin \pi f \Delta}{\pi f \Delta} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi f \Delta}{2n_m} \right), \quad (4)$$

где учтено равенство  $\Delta = 2n_m \Delta_0$ .

Графики спектральной плотности мощности, вычисленные согласно (4), для форматов ВОС (1, 1) и ВОС(5, 1) представлены на рис. 2, а и 2, б соответственно, также на них для сравнения приведены аналогичные зависимости для прямоугольного чипа той же длительности  $\Delta$  (пунктирная линия).

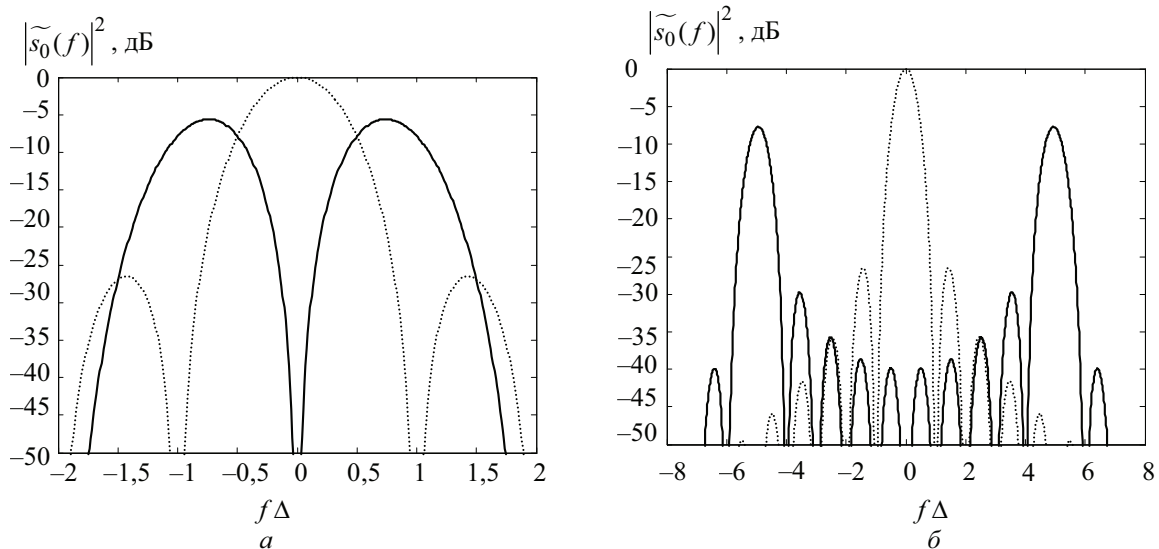


Рис. 2

**Упрощенная модель канала навигационного приемника.** Навигационный приемник потребителя представляет собой сложное электронное устройство, которое можно разбить на ряд функциональных блоков: входной каскад, блок корреляторов и схема выделения навигационной информации из потока данных. Для оценки точности измерения

запаздывания сигналов упростим ее до последовательно включенного фильтра нижних частот, имитирующего входной тракт, и одного коррелятора, в котором сравнивается пришедшее колебание с опорным, задержанным на время  $\tau$ . Схема подобного приемника изображена на рис. 3. На вход поступает аддитивная смесь модулированного дальномерного кода  $S_{\text{ВХ}}(t)$  и белого гауссовского шума  $n_{\text{ВХ}}(t)$ , которая, пройдя через входной тракт с ограниченной полосой пропускания (сигналы после ФНЧ –  $S_{\text{ВЫХ}}(t)$ ,  $n_{\text{ВЫХ}}(t)$ ), попадает в коррелятор, где сравнивается с опорой-эталоном  $S_{\text{ВЫХ}}(t - \tau)$ . Меняя задержку эталонного сигнала  $\tau$ , отыскивают такое ее значение, которое обеспечивает максимум корреляции  $\rho_{kl}(\tau)$  в точке взятия отсчета.

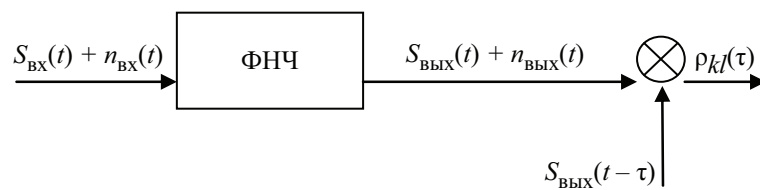


Рис. 3

Выражение для корреляционной функции  $\rho_{kl}(\tau)$  на выходе схемы будет иметь вид

$$\rho_{kl}(\tau) = \frac{1}{\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} S_{\text{СУМ}}(t) S_{\text{ВЫХ}}(t - \tau) dt, \quad (5)$$

где  $S_{\text{СУМ}}(t) = S_{\text{ВЫХ}}(t) + n_{\text{ВЫХ}}(t)$ . В случае же отсутствия шума на входе формула (5) упрощается:

$$\rho_{kk}(\tau) = \frac{1}{\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} S_{\text{ВЫХ}}(t) S_{\text{ВЫХ}}(t - \tau) dt. \quad (6)$$

На рис. 4 приведены корреляционные функции чипов ВОС (1, 1) (а) и ВОС (5, 1) (б), вычисленные согласно (6) для случая бесконечно широкой полосы пропускания ФНЧ. Для сравнения на этих же графиках показаны аналогичные кривые для элемента дальномерного кода прямоугольной формы. Из рис. 4, а можно сделать вывод о превосходстве сигнала ВОС (1, 1) над чипом прямоугольной формы в ширине главного лепестка, что благоприятно сказывается на точности позиционирования, а боковой лепесток отрицательной полярности позволяет повысить стойкость к помехам, свойственным при низком энергопотенциале точки приема. С ростом же числа периодов меандра ВОС-модулированного сигнала увеличивается число боковых лепестков, амплитуда которых стремится к главному лепестку (см. рис. 4, б). Поэтому при малом отношении сигнал/шум характеристики помехоустойчивости предлагаемых сигналов, очевидно, окажутся схожими с аналогичными, полученными для чипа прямоугольной формы.

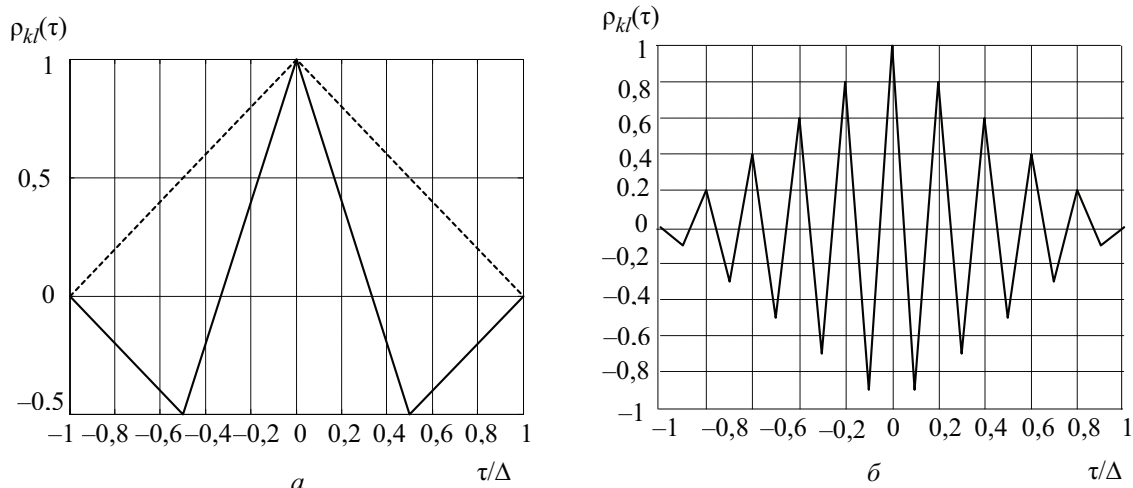


Рис. 4

**Оценка точности измерения запаздывания.** В свете вышеизложенного для всесторонней оценки качественных показателей ВОС-сигналов в части точности измерения задержки необходимо решить задачу при разной помеховой обстановке в точке приема.

При высоком отношении сигнал/шум потенциальную точность измерения неизвестного параметра сигнала можно определить аналитически, используя фундаментальную границу Крамера–Рао, описывающую в общем виде зависимость дисперсии оценки от второй производной логарифма функции правдоподобия

$$D\{\hat{\lambda}|\lambda\} \geq \left\{ \left[ \frac{d \ln W(y(t)|\lambda)}{d\lambda} \right]^2 \right\}^{-1} = - \left[ \frac{d^2 \ln W(y(t)|\lambda)}{d^2\lambda} \right]^{-1}, \quad q \gg 1, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – оцениваемый параметр;  $W(y(t)/\lambda)$  – функция правдоподобия;  $q$  – отношение сигнал/шум. Для оценки точности измерения времени запаздывания сигнала выражение (7) упрощается [3]:

$$D\{\hat{\tau}\} \geq 1/(\beta^2 q^2), \quad (8)$$

где  $\beta$  – эффективная ширина спектра сигнала, рассчитываемая как

$$\beta^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 |\tilde{s}_0(2\pi f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{s}_0(2\pi f)|^2 df}, \quad (9)$$

где  $|\tilde{s}_0(2\pi f)|$  – амплитудный спектр сигнала.

Интегрируя выражение (4) согласно правилу (9) и подставляя результат в (8), можно получить аналитическую оценку потенциально достижимой точности измерения запаздывания сигнала.

На рис. 5, *а* приведены зависимости дисперсии оценки задержки для чипа прямоугольной формы и  $\text{BOC}(n, 1)$  при  $n = 1..5$  от отношения сигнал/шум, вычисленные согласно (8). На рис. 5, *б* представлена та же зависимость при большом отношении сигнал/шум.

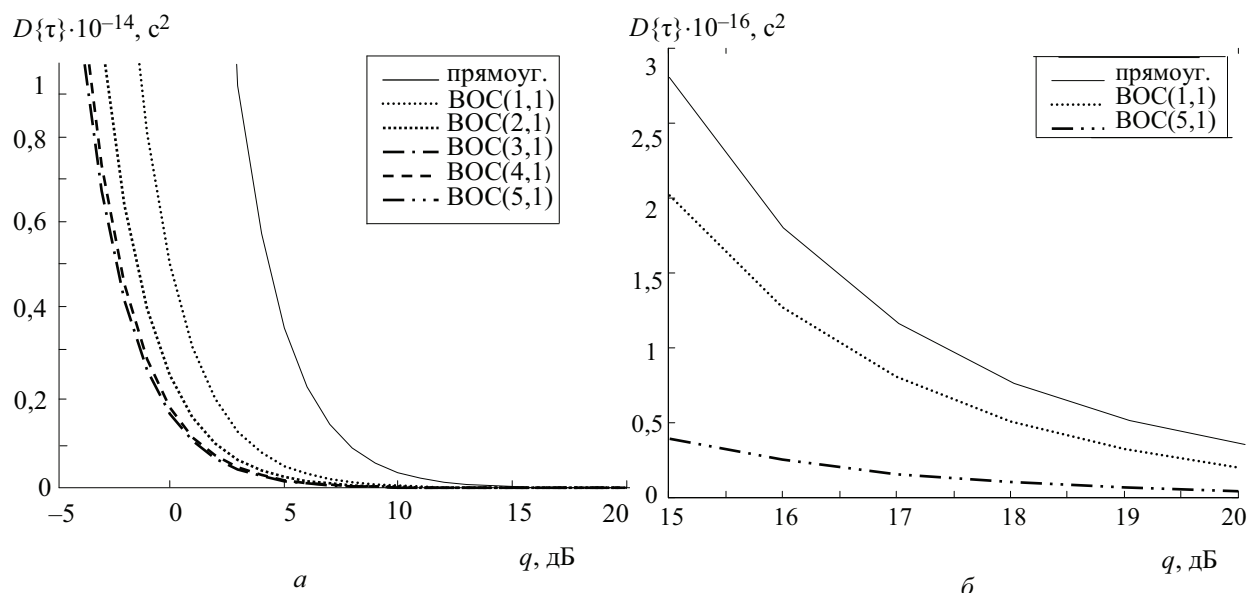


Рис. 5

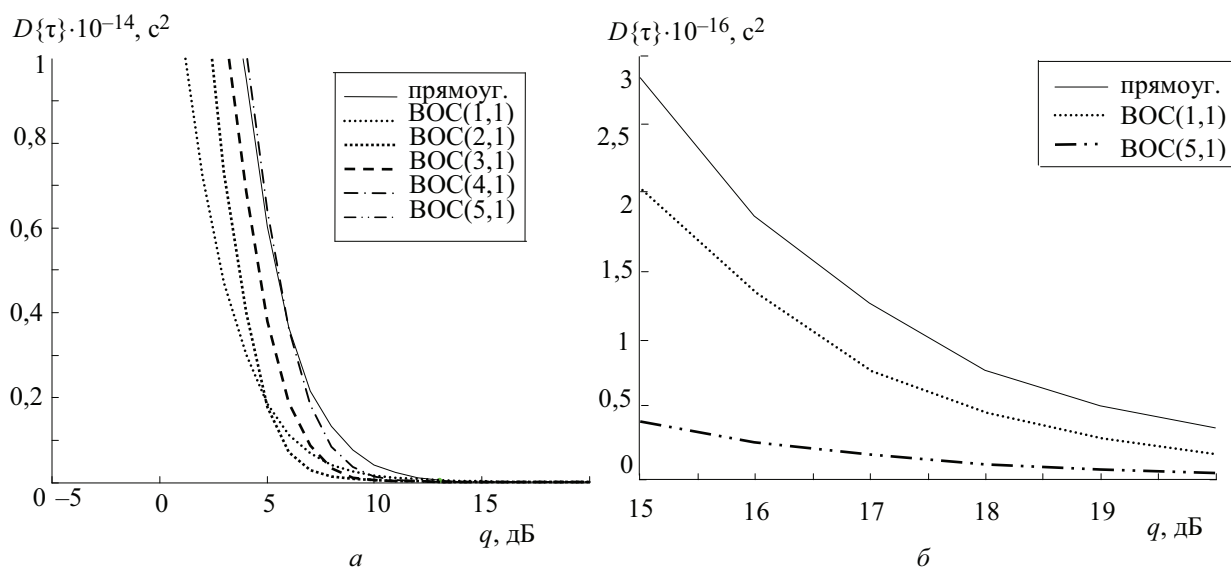


Рис. 6

При работе в условиях низкого энергopotенциала формула (8) неприменима и для оценки точности следует прибегнуть к численному расчету, основанному на многократном повторении эксперимента согласно выражению (5), и вычислению дисперсии набранной статистики  $\rho_{kl}(0)$  для фиксированных отношений сигнал/шум. Результаты проведенного численного анализа для разных модуляций BOC, а также для чипа прямоугольной формы представлены на рис. 6 и из них можно сделать вывод, что при высоком уровне шума в точке приема лучшим по точности измерения запаздывания оказывается BOC(1, 1).

Таким образом, при оценке точности с помощью границы Крамера–Рао ВОС(5, 1) является лучшей кандидатурой и обладает наименьшей дисперсией измерения задержки среди всех исследованных сигналов, однако такой вывод справедлив только при больших отношениях сигнал/шум.

При работе в условиях высокого энергопотенциала лучшей кандидатурой для применения в новом поколении пользовательского радиointерфейса оказывается ВОС(5, 1), поскольку обладает самым узким главным пиком корреляционной функции.

Рост числа периодов меандра на длительности чипа приводит к еще более привлекательным характеристикам, однако бесконечное увеличение невозможно, поскольку ширина полосы, выделенная системе, строго определена.

Картина меняется при снижении отношения сигнал/шум. В этом случае необходимо учитывать боковые лепестки корреляционной функции, амплитуда которых с ростом числа периодов меандра стремится к главному, что приводит к росту вероятности их перепутывания. Поэтому дисперсия оценки запаздывания сигнала ВОС(5, 1) будет совпадать с полученной для прямоугольного чипа. Лучшей же кандидатурой окажется ВОС(1, 1), обладающая как более узким главным корреляционным пиком, так и боковым лепестком отрицательной полярности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (Государственный контракт № П1033 от 27 мая 2010).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Interface specification. Draft IS-GPS-800. Navstar GPS Space Segment/User Segment L1C Interfaces, 2006. 133 p.
2. Гайворонский Д. В., Ипатов В. П. Возможности улучшения характеристик дальномерных сигналов за счет усложнения структуры чипов // Восьмой междунар. симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. СПб., 2009. С. 153–156.
3. Современная радиолокация / Пер. с англ. Ю. Б. Кобзарев. М.: Сов. радио, 1969. 700 с.

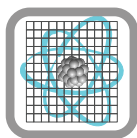
*D. V. Gayvoronsky, O. A. Dmitrieva*

#### *ASSESSMENT OF THE BOC SIGNAL DELAYS MEASUREMENT ACCURACY*

*Various signal types are required for modernized global satellite systems. One way to achieve high accuracy are using BOC modulation which has good intrasystem electromagnetic compatibility with all signals. This kind of modulation enhances the signal delay estimation accuracy. The paper considers several variants of noise conditions at the receiver, where the BOC modulation outperforms other methods.*

**Global navigation satellite system, ranging sequence, chip, Manchester code, correlation function**





УДК 621.38, 621.793, 533.9

*В. Т. Барченко, Н. В. Крупович, С. Ю. Удовиченко*

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА, ВОЗБУЖДЕННОГО В УСЛОВИЯХ ЛЕВОЙ ВЕТВИ КРИВОЙ ПАШЕНА

*Развита аналитическая модель сильноточной формы тлеющего разряда низкого давления в магнитном поле. Модель учитывает генерацию быстрых электронов на катоде под действием падающих на него ионов плазмы. Рассмотрено влияние эмиссии быстрых и медленных электронов из газоразрядного промежутка на условия горения разряда.*

**Полый катод, тлеющий разряд, магнитное поле, плазма низкого давления**

В работе [1] представлена аналитическая модель сильноточной формы тлеющего разряда низкого давления в магнитном поле. Определение нижней границы рабочего диапазона давления представляет особый интерес, поскольку одним из основных применений тлеющего разряда является создание источников заряженных частиц, в которых низкое давление газа необходимо для обеспечения электрической прочности ускоряющего промежутка. Представленная модель не учитывает генерацию быстрых электронов за счет  $\gamma$ -процессов на катоде под действием падающих на него ионов плазмы. Это обстоятельство приводит к переопределению минимальных значений индукции магнитного поля и давления газа, при которых возможно самоподдержание разряда. Не найдены условия существования разряда при отборе из него плазменных электронов.

**Модель разряда с учетом эмиссии электронов с катода.** Оставаясь в рамках предложенной в [1] модели одномерного диода с плоскими катодом и анодом, вдоль которых направлено однородное магнитное поле, представим уравнение непрерывности и уравнение для потока быстрых электронов в следующем виде:

$$\frac{d}{dx}(n_f v_f) = -\frac{n_f}{\tau_{rf}} + \frac{\gamma n_{ic} v_s}{2d}; \quad (1)$$

$$n_f v_f = -D_f \frac{dn_f}{dr}, \quad (2)$$

где  $n_f$ ,  $v_f$  и  $\tau_{rf} = eU_c / v_i W$  – концентрация, средняя скорость направленного движения поперек магнитного поля и характерное время релаксации быстрых электронов соответственно ( $U_c$  – катодное падение потенциала;  $v_i$  – частота ионизации;  $W$  – энергия, затрачиваемая быстрым электроном на ионизацию атома газа);  $\gamma$  – эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии;  $D_f = eU_c v_{f0} / 3m \omega_{Be}^2$  – коэффициент диффузии ( $v_{f0}$  – частота упругих столкновений с атомами;  $\omega_{Be} = eB / m$  – ларморовская частота, причем для замагниченных электронов  $\omega_{Be} \gg v_{f0}$ ). Положительным направлением для потоков быстрых и медленных электронов считается направление от катода к аноду. Начало системы координат совмещено с плоскостью катода ( $x = 0$ ), а координата анода  $x = d$ .

Второй член в правой части (1) описывает появление быстрых электронов в объеме за счет  $\gamma$ -процессов на катоде под действием падающих на него ионов плазмы [2], [3]. Здесь  $n_{ic}$  и  $v_s = (T_e / M)^{1/2}$  – концентрация и скорость, с которой ионы выходят из области квазинейтральной плазмы на катод ( $T_e$  – температура плазменных электронов;  $M$  – масса ионов).

Время жизни незамагниченных ионов в бесстолкновительном режиме  $\tau_i = 2d / v_s$ , а с учетом столкновений с атомами газа  $\tau_i = d^2 / D_i$  ( $D_i = 2T_i / Mv_{i0}$ ;  $v_{i0}$  – коэффициент диффузии и частота столкновений соответственно;  $T_i$  – температура ионов).

Из (1), (2) следует уравнение второго порядка относительно  $n_f$ :

$$D_f \frac{d^2 n_f}{dx^2} = \frac{n_f}{\tau_{rf}} - \frac{\gamma n_{ic} v_s}{2d}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) можно представить в виде

$$n_f(x) = n_{f0} \left( 1 - \frac{\text{sh}(x/\lambda_f)}{\text{sh}(d/\lambda_f)} \right), \quad (4)$$

удовлетворяющем нулевому граничному условию на аноде ( $x = d$ ). В формуле (4) введены обозначения:  $n_{f0} = n_f(0) = \gamma n_{ic} v_s \tau_{rf} / 2d$  и  $\lambda_f = (D_f \tau_{rf})^{1/2}$  – диффузионная длина или длина релаксации быстрых электронов.

Плотность тока электронов плазмы на аноде найдем, проинтегрировав уравнение непрерывности для медленных частиц:

$$j_{ea} = \int_0^d e v_i n_f dx = e v_i n_{f0} \left( d + \lambda_f \frac{1 - \text{ch}(d/\lambda_f)}{\text{sh}(d/\lambda_f)} \right). \quad (5)$$

При интегрировании в уравнении непрерывности для медленных электронов не учитывался член, связанный с переходом электронов из группы быстрых частиц в группу медленных, поскольку он существенно меньше ионизационного члена.

Как следует из работы [3], коэффициент размножения плазменных электронов  $\alpha = eU_c / W$  связан с отношением тока быстрых электронов на аноде к полному току разряда  $\psi = I_{fa} / I$  следующим образом:

$$\alpha \approx \frac{1}{\gamma - \psi}. \quad (6)$$

Эта связь справедлива для произвольной геометрии разрядной ячейки.

Полагая, что ток электронов на аноде переносится главным образом плазменными электронами, из (6) с помощью выражений (2), (4), (5) получим условие самоподдержания разряда

$$u \left( 1 - \frac{\text{ch}(2.61b/u)}{(2.61b/u) \text{sh}(2.61b/u) + 1} \right) = 1, \quad (7)$$

где введены безразмерные переменные  $u = U_c / U_0$ ;  $b = B / B_0$  и параметры  $U_0 = W / e\gamma$ ;  $B_0 = 1.5 (mWv_{j0} / v_i)^{1/2} / e\gamma d$ , причем  $v_{j0} \approx 2v_i$ .

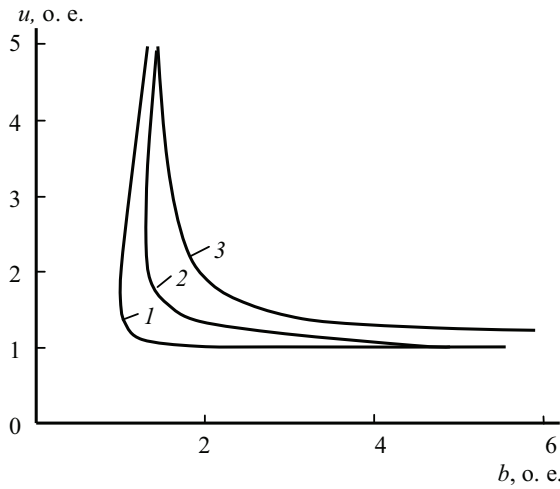


Рис. 1

На рис. 1 представлена зависимость  $u/b$ , вытекающая из условия (7) и из аналогичного условия [1]. С учетом эмиссии электронов с поверхности плоского катода минимальное значение индукции магнитного поля  $B_{\min} = 1.29B_0$ , при котором еще возможно существование тлеющего разряда, имеет место в точке  $u = 2.67$ . Без учета эмиссии электронов  $B_{\min} = B_0$  при  $u = 1.73$ .

Наименьшее рабочее давление газа, достигаемое при минимально возможной индукции магнитного поля, определяется соответствующей формулой в [1].

**Влияние эмиссии быстрых и медленных электронов из газоразрядного промежутка на условия горения разряда.** Пусть газоразрядный промежуток в направлении магнитного поля имеет длину  $L$ . На боковые электроды подан катодный потенциал, препятствующий уходу электронов. Один из этих электродов выполнен в виде сетки с прозрачностью  $\varepsilon$ , через которую происходит эмиссия частиц из разрядной плазмы.

При наличии эмиссии быстрых электронов с катода и из газоразрядного промежутка уравнение непрерывности для этой группы частиц имеет вид

$$\frac{d}{dx} (n_f v_f) = -\frac{n_f}{\tau_{rf}} - \frac{n_f}{\tau_{ef}} + \frac{\gamma n_{ic} v_s}{2d},$$

где характерное время полных потерь, согласно работе [1], определяется как

$$\tau_f = \frac{\tau_{rf} \tau_{ef}}{\tau_{rf} + \tau_{ef}},$$

$\tau_{ef} = 4L(2m / eU_c)^{1/2} / \varepsilon$  – время потерь частиц в результате эмиссии из разряда.

В этом случае для самоподдержания разряда должно выполняться следующее условие:

$$\frac{u}{1 + \beta u^{3/2}} \left( 1 - \frac{\text{ch } z}{z \cdot \text{sh } z + 1} \right) = 1,$$

где  $z = (2.61b/u)(1 + \beta u^{3/2})^{1/2}$  и  $\beta = \varepsilon (2W/m)^{1/2} / 8\gamma^{3/2} v_i d$ .

На рис. 2 представлена зависимости  $u(b)$ , когда параметр  $\beta = 0.2; 0.3$ .

С увеличением  $\beta$  зависимости смещаются вправо и вверх, т. е. возрастают минимальные значения напряжения и магнитного поля, необходимых для поддержания сильного точного разряда.

Рассмотрим влияние эмиссии медленных электронов плазмы из газоразрядного промежутка на характеристики разряда. Пусть участок извлечения электронов через сетку расположен со стороны анода и имеет продольный размер  $(d - d_0)$ . Концентрация медленных электронов ( $n_e$ ) удовлетворяет следующему уравнению одномерной амбиполярной диффузии [4]:

$$D_a \frac{d^2 n_e}{dx^2} = \frac{n_e}{\tau_e} - v_i n_f, \quad (8)$$

которое следует из уравнения непрерывности и уравнения для потока плазменных электронов. Протекание тока через квазинейтральную плазму связано с электрическим полем, создаваемым внешними источниками, и не приводит к изменению плотности частиц в плазме, поскольку дивергенция от этого тока равна нулю.

В уравнении (8) приняты следующие обозначения:  $D_a = D_e(1 + T_i / T_e)$ ; в неизотермической плазме температура ионов  $T_i \ll T_e$ ;  $D_e = T_e v_{e0} / m \omega_{Be}^2$ ;  $v_{e0}$  – эффективная частота упругих столкновений плазменных электронов с атомами газа;  $\tau_e = 4L / \epsilon v_{Te}$  – характерное время потерь этих электронов в результате эмиссии с тепловой скоростью  $v_{Te}$ .

Интегрирование уравнения непрерывности медленных электронов на участке  $[0, d_0]$ , где отсутствует их эмиссия, дает следующее выражение для потока:

$$n_e v_e = -D_e \frac{dn_e}{dz} + b_e n_e \frac{d\phi}{dz} = v_i n_f 0 \left( z - \lambda_f \frac{\text{ch}(z / \lambda_f)}{\text{sh}(d / \lambda_f)} \right) + C_0, \quad (9)$$

где  $b_e$  и  $\phi$  – коэффициент подвижности электронов и потенциал электрического поля соответственно,  $n_f 0$  определена в формуле (4). Константа  $C_0$  находится из равенства нулю потока электронов (9) на катоде:

$$C_0 = b_e n_e \frac{d\phi}{dz} = \frac{v_i n_f 0 \lambda_f}{\text{sh}(d / \lambda_f)}.$$

Интегрирование уравнения (8) на этом же участке диода дает выражение для производной концентрации электронов

$$\frac{dn_e}{dz} = -\frac{v_i n_f 0}{D_e} \left( z - \lambda_f \frac{\text{ch}(z / \lambda_f)}{\text{sh}(d / \lambda_f)} \right) + C_1. \quad (10)$$

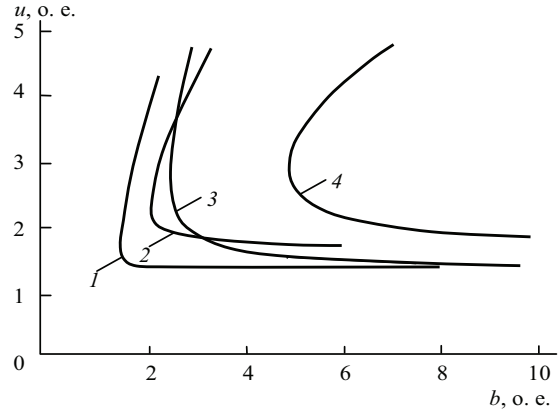


Рис. 2

Подставив производную (10) в (9) при  $z = 0$ , получим  $C_1 = 0$ .

В условиях  $d_0 > \lambda_f$  на участке  $[d_0, d]$  отсутствует ионизация газа быстрыми электронами и имеет место эмиссия медленных электронов из разрядного промежутка. В этом случае из (8) получим выражение для концентрации электронов на этом участке, удовлетворяющее нулевому значению на аноде:

$$n_e = C_3 \left[ \text{sh} (z/\lambda_e) - \text{ch} (z/\lambda_e) \text{th} (d/\lambda_e) \right],$$

где  $\lambda_e = (D_e \tau_e)^{1/2}$ .

Аналогично (9) для потока медленных электронов на этом участке находим:

$$n_e v_e = -C_3 \frac{\lambda_e}{\tau_e} \left[ \text{ch} (z/\lambda_e) - \text{sh} (z/\lambda_e) \text{th} (d/\lambda_e) \right] + C_4,$$

причем  $C_4 = C_0$ .

Используя условия непрерывности потока и производной концентрации плазменных электронов в точке  $z = d_0$ , получим для плотности тока на аноде:

$$j_e(d) = ev_i n_{f0} \left[ \frac{d_0 - \lambda_f \text{ch} (d_0/\lambda_f) / \text{sh} (d/\lambda_f)}{\text{ch} (d/\lambda_e) \text{ch} (d_0/\lambda_e) - \text{sh} (d/\lambda_e) \text{sh} (d_0/\lambda_e)} + \frac{\lambda_f}{\text{sh} (d/\lambda_f)} \right]. \quad (11)$$

Нетрудно видеть, что в отсутствие эмиссии медленных электронов при  $d_0 \rightarrow d$  выражение (11) совпадает с (5).

На рис. 1 кривая 3 отображает зависимость  $u(b)$  при  $d/\lambda_e \approx 1$  и  $d_0 = 0.5d$ .

Отметим, что рассмотренное приближение, когда отсутствует ионизация газа быстрыми электронами на участке  $[d_0, d]$ , дает приемлемый результат в случае  $d < \lambda_f$  и  $d_0/d \sim 0.5$ . Это объясняется тем, что концентрация быстрых частиц резко падает от катода к аноду, и в прианодную часть разряда они попадают, уже в значительной степени реализовав свою способность к ионизации.

Из условия превышения диффузионной длины плазменных электронов над длиной разрядного промежутка ( $d/\lambda_e \leq 1$ ) следует, что поддержание сильноточной формы разряда будет обеспечено при давлении газа ( $p$ ) больше некоторого  $p_0$ , определяемого следующим выражением:

$$p_0 = \frac{\varepsilon \omega_{Be}^2}{4L\nu_{Te} \nu_{e0}},$$

где  $\nu_{e0}$  – эффективная частота столкновений для плазменных электронов при давлении 1 Торр.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулин С. П. Условия существования положительно заряженной структуры в тлеющем разряде с осциллирующей электронов в магнитном поле // ЖТФ. 1998. Т. 68, вып. 7. С. 56–63.
2. Зюлькова Л. А., Козырев А. В., Проскуровский Д. И. Расчет параметров сильноточного отражательного разряда с горячим катодом // ЖТФ. 2005. Т. 75, вып. 11. С. 59–64.

3. Козырев А. В. О напряжении горения сильноточного разряда низкого давления // Тр. III междунар. Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», Улан-Удэ, 23–30 июня 2009 г. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. С. 5–9.

4. Рожанский В. А., Цендин Л. Д. Столкновительный перенос в частично ионизованной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1988.

*V. T. Barchenko, N. V. Krupovich, S. Yu. Udovichenko*

#### *EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON THE CHARACTERISTICS OF A GAS DISCHARGE EXCITED IN THE LEFT BRANCH OF THE PASCHEN CURVE*

*The analytical model high-current forms of the decaying category of low pressure in a magnetic field is developed. The model considers generation fast electrons on the cathode under the influence of ions of plasma falling on it. Influence of issue fast and slow electrons from a gas-discharge interval on conditions of burning of the category is considered.*

**Hollow cathode, glow discharge, magnetic field, low pressure plasma**

УДК 621.315.592.4

*С. С. Карпова*

## **МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХ ГАЗОВ С ОКСИДАМИ МЕТАЛЛОВ**

*Рассмотрены основные вопросы, касающиеся механизма чувствительности металлооксидных газовых сенсоров. Рассмотрены основные стадии взаимодействия восстанавливающих газов с поверхностью оксида и факторы, определяющие каталитическую активность материалов в реакциях различного типа. Показано, что наличие центров двух типов, обладающих разными восстановительными и кислотно-основными свойствами, которые принимают участие в процессах адсорбции и окисления молекул газа, является одним из главных требований для достижения большой величины отклика детектирования газа.*

**Газовые сенсоры, оксиды металлов, каталитическая активность, кислотно-основные реакции, окислительно-восстановительные реакции**

Кондуктометрические полупроводниковые металлооксидные газовые сенсоры в настоящее время относятся к одной из наиболее исследуемых групп газовых сенсоров. Они представляют огромный интерес благодаря низкой стоимости и гибкости их производства, простоте их использования, большому числу детектируемых газов и возможных областей применения. Кроме изменения проводимости газочувствительного материала, детектирование этой реакции может происходить через измерение изменения емкости, рабочей функции, массы, оптических характеристик или энергии реакции, выделившейся при взаимодействии газа с твердым телом [1]. Данная статья полностью посвящена кондуктометрическим газовым сенсорам.

В последние годы было опубликовано большое количество статей, посвященных исследованию металлооксидных газовых сенсоров, в большинстве из которых сообщается о хороших характеристиках чувствительности к индивидуальным газам, получаемых главным образом путем измерения сигналов лабораторных образцов (изменение электрического сопротивления образца / сенсора) в условиях, далеких от реальных условий работы сенсора, т. е. в отсутствие условий, влияющих на газочувствительность (например, влажность, присутствие газов, создающих помехи, температура и т. д.).

Многие оксиды металлов пригодны для детектирования горючих, взрывоопасных, восстанавливающих или окисляющих газов, их проводимость является измеряемым параметром. Проводимость следующих оксидов изменяется при взаимодействии с газами:

$\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ .

В СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в течение многих лет проводятся исследования, посвященные разработке методов получения и анализа газовых сенсоров. Газочувствительные материалы на основе диоксида олова создавались методом управляемого окисления напыленного олова [2], магнетронного напыления [3], физическими методами формирования пористых структур [4], химическими методами получения пористых структур, а именно золь-гель-методом [5] и гидропиролизом [6]. Проводились и теоретические расчеты параметров газочувствительных материалов, таких как концентрация собственных точечных дефектов в диоксиде олова [7], а также механизмов адсорбции газов на полупроводниковых оксидах [8]. Разработаны оригинальные методики контроля сенсорных слоев, в том числе измерение газочувствительности в автоматическом режиме [9] и анализ нановыделений в сетчатых газочувствительных слоях методом внутреннего трения [10]. В настоящее время решаются задачи улучшения селективности и чувствительности сенсорных слоев путем создания материалов с иерархической структурой и трехмерных сетчатых структур. В таких материалах информативным является не только изменение активного сопротивления, но и емкостный сигнал, который позволяет значительно улучшить селективность детектирования разных газов [11]–[13].

На газочувствительные свойства оксидов металлов влияет большое количество факторов: свойства материала (адсорбционная способность, каталитическая активность, температурная стабильность), площадь поверхности и микроструктура сенсорного слоя, наличие добавок и примесей, температура, влажность и т. д. Многие металлооксидные материалы удовлетворяют отдельным требованиям, однако лишь немногие материалы обладают всем комплексом необходимых свойств. По этим причинам наряду с однокомпонентными оксидами металлов широко исследуются двух- и многокомпонентные оксиды, в том числе ферриты, которые в ряде случаев обладают значительно большей газочувствительностью, например  $\text{SnO}_2\text{--Mo}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2\text{--ZnO}$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  и др. Сенсоры, содержащие два компонента и более, обладают большей газочувствительностью, чем отдельные их составляющие, благодаря синергетическому эффекту, возникающему между компонентами композитного материала. Следует отметить, что синергетический эффект проявляется не во всех случаях. Улучшение газочувствительных свойств композитных материалов – кооперативный эффект. Поэтому актуальной задачей является исследование каталитической активности различных простых и сложных оксидов металлов и установление закономерностей между каталитическими свойствами поверхности сенсора и его газочувствительностью. Улучшение чувствительности и селективности чувствительных элементов газовых сенсоров возможно, принимая во внимание особенности протекания окислительно-восстановительных и кислотно-основных каталитических реакций на поверхности твердого тела. Экспериментально такие работы проводятся путем подбора смешанных сложных катализаторов.

Основной целью настоящего обзора является анализ возможностей теоретического выбора компонентов катализаторов для газочувствительных сенсоров в сложных оксидных системах, представляющих собой как смеси различных оксидов на молекулярном уровне, так и химические соединения различных оксидов, такие как ферриты.

Обратимое взаимодействие газа с поверхностью материала является характеристикой кондуктометрических полупроводниковых металлооксидных газовых сенсоров [1]. Принцип детектирования основан на изменении электрического сопротивления чувствительного элемента под воздействием восстанавливающего газа, как правило, при повышенной температуре. На поверхности оксидов хемосорбированный кислород может находиться в различных формах – молекулярной или атомной, нейтральной или заряженной. Высокая электрофильность кислорода делает вероятным образование отрицательных ионов:  $O_2^-$ ,  $O_2^{2-}$ ,  $O^-$  и  $O^{2-}$ . Изменение электропроводности обусловлено захватом электронов адсорбированных молекул и соответствующим изгибом зон. Когда молекулы или атомы кислорода адсорбируются на поверхности оксида металла, они захватывают электроны из зоны проводимости и заряжаются отрицательно, что приводит к изгибу зон и образованию области пространственного заряда. На рис. 1 представлена схема изгиба зон после хемосорбции заряженных молекул (в данном случае ионсорбции кислорода), где обозначены:  $E_C$ ,  $E_V$  и  $E_F$  – дно зоны проводимости, потолок валентной зоны и уровень Ферми соответственно;  $\Delta_B$  – толщина области пространственного заряда;  $eV_{\Pi}$  – потенциальный барьер; «+» – донорные центры. В результате химических реакций адсорбированного кислорода с восстанавливающими газами или адсорбции других молекул и замещения ими адсорбированного кислорода изгиб зон уменьшается и может даже стать обратным, что приводит к увеличению проводимости. При рабочей температуре большинства газовых сенсоров 300...450 °С доминирующей формой адсорбированного кислорода является  $O^-$ .

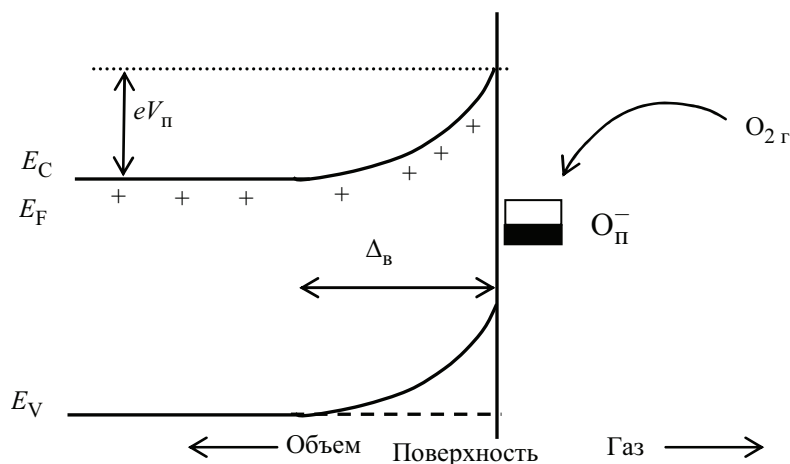


Рис. 1

Реакции взаимодействия восстанавливающих газов с оксидами металлов на молекулярном уровне гораздо сложнее. Процесс взаимодействия оксида металла с детектируемым газом является многостадийным процессом, включающим как окислительно-восстановительные, так и кислотно-основные каталитические реакции. Его можно разбить на следующие основные стадии: диффузия компонентов к поверхности, адсорбция, собственно каталитическая реакция (химические превращения на поверхности, обычно несколько стадий), десорбция и обратная диффузия продуктов реакции.

В большинстве газовых сенсоров отклик проводимости определяется эффективностью каталитических реакций с участием детектируемого газа, происходящих на поверхности газочувствительного материала. В результате каталитических реакций с участием поверхностного кислорода могут изменяться и поверхностный потенциал, и концентрация точечных дефектов, определяющие электрофизические свойства поли- и нанокристалли-



ческих оксидов металлов. Типичным примером такой реакции является окисление CO с участием хемосорбированного кислорода на поверхности оксида металла. Считается, что высокая каталитическая активность поверхности и особенно селективность реакции с детектируемым газом являются одними из главных преимуществ сенсорного материала, поэтому исследование каталитической активности материала часто используется в качестве метода предварительной оценки его пригодности для использования в качестве газочувствительного элемента, а также для определения рабочей температуры сенсора. Как правило, положение максимума сенсорного отклика совпадает с температурой, соответствующей 50 % конверсии детектируемого газа. Рабочая температура является важным параметром для газовых сенсоров, поскольку она определяет мощность нагревателя, необходимую для достижения оптимальных газочувствительных характеристик, таким образом влияя на надежность и долговечность сенсоров.

Следует отметить, что максимальная каталитическая активность для различных газов наблюдается при различных температурах, поэтому, изменяя рабочую температуру, можно управлять селективностью сенсора. Например, максимальная чувствительность к метану часто наблюдается при больших температурах, чем к CO, позволяя предположить, что для сенсоров, селективно детектирующих метан, необходима высокая рабочая температура, а для селективных сенсоров на CO – более низкая. Несмотря на схожую природу химических сенсоров и гетерогенных катализаторов, выбор материалов для газовых сенсоров не определяется лишь каталитической активностью. В то же время следует заметить, что выбор материала для модификации оксида металла часто обусловлен каталитическими свойствами этого материала.

Многочисленные исследования показали, что для эффективной работы хемосорбционного сенсора газочувствительный материал должен обладать особым сочетанием параметров адсорбции / десорбции кислорода и детектируемых газов. Чем меньше энергия активации хемосорбции и чем больше энергия активации десорбции, тем лучше газочувствительные свойства сенсоров адсорбционного типа. В то же время следует принимать во внимание, что чрезвычайно большая энергия активации десорбции может быть причиной значительного увеличения времени отклика, неприемлемого для практического применения. Установлено, что процессы обмена электронами между зоной проводимости и адсорбированными молекулами для большинства материалов, таких как SnO<sub>2</sub> и In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, уже при температурах, больших 100 °C, протекают достаточно быстро. Кинетика отклика сенсоров на основе этих материалов определяется только процессами адсорбции / десорбции кислорода и воды, поэтому для таких сенсоров требуется материал с оптимальной энергией активации десорбции при данной рабочей температуре.

Хотя каталитическое взаимодействие оксидов металлов с детектируемыми газами относится к поверхностным феноменам, объемные свойства оксидов также следует учитывать при рассмотрении каталитических процессов. Объемные свойства во многом определяют некоторые важные аспекты поверхностных реакций, включая природу и распределение дефектов и стабилизацию поверхностных структур. Некоторые объемные свойства широко обсуждаются в связи с каталитическими реакциями, в том числе электроотрицательность катионов металлов, потенциал Маделунга, оптическая основность, энергия связи металл-кислород, основность, ширина запрещенной зоны, степень ионности связи [14].

Идея сопоставления каталитических реакций с электроотрицательностью и энергией связи металл-кислород не нова. В [15] систематизированы реакции на поверхности оксидов и выделено два класса реакций: кислотно-основные реакции (переход протона) и окислительно-восстановительные (переход электрона). Установлено, что кислотно-основные реакции следует сопоставлять с кислотно-основными свойствами Льюиса, которые, в свою очередь, определяются электроотрицательностью. О. В. Крылов выявил отсутствие корреляции между каталитической активностью для дегидрогенизации изопропилового спирта в ацетон и пространственным разделением ионов металла и неметалла [16]. Однако им была обнаружена зависимость каталитической реакции от электроотрицательности неметаллов. Другие исследователи также неоднократно наблюдали корреляцию между электроотрицательностью катионов металлов и скоростью гидрогенизации CO и CO<sub>2</sub>.

С другой стороны, большинство окислительно-восстановительных реакций, протекающих при взаимодействии газа с поверхностью оксида металла, ограничены стадией, в которой происходит разрыв связи между хемосорбированным кислородом и катионом металла. В таких случаях скорость реакции должна коррелировать с энергией связи металл-кислород. На самом деле, уменьшение скорости окисления CO в CO<sub>2</sub> хорошо коррелирует с увеличением энергии связи M–O. Обнаружено также, что скорость реакции частичного окисления этанола может быть хорошо сопоставлена с плотностью основных центров, определяемой по адсорбции CO<sub>2</sub>. На рис. 2 показано поглощение CO<sub>2</sub> как функция энергии  $E_{M-O}$  [14]. Видно, что материалы, адсорбирующие большое количество CO<sub>2</sub>, имеют слабую силу связи катиона металла с анионом кислорода. Однако в целом картина гораздо сложнее.

При исследовании адсорбции кислорода на оксидах остается неопределенным исходное состояние адсорбента, так как содержание кислорода в объеме и особенно в приповерхностных слоях оксидов не отвечает стехиометрии и зависит от температуры и давления кислорода. Тренировка в вакууме с целью удаления с поверхности загрязнений может приводить к обеднению кислородом приповерхностных слоев. Для определения энергии связи кислорода на поверхности оксидов в работе [17] образцы прогревались при 773 К в вакууме для удаления примесей, после чего обрабатывались при той же температуре в кислороде (10<sup>3</sup> Па), охлаждались до 323 К и откачивались в течение часа. Эти состояния принимались за стандартные. Энергия связи кислорода определялась из температурной зависимости равновесного давления кислорода. Количество кислорода, переходящего в газовую фазу в процессе измерений, не превышало 0.1 % монослоя. Результаты исследований энергии связи кислорода на поверхности различных оксидов представлены в таблице.

Показана корреляция между энергией связи металл-кислород (или энергией хемосорбции кислорода на катионе металла) и шириной запрещенной зоны оксида [18]. На рис. 3 представлена зависимость ширины запрещенной зоны оксидного материала от энергии связи катиона металла с кислородом. Чем больше ширина запрещенной зоны, тем труднее оксид отдает кислород. Чаще всего оксиды с низкими значениями энергии связи M–O являются

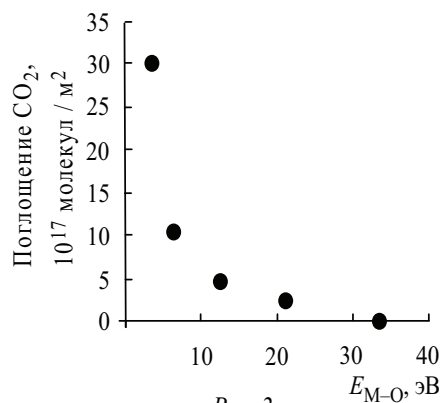


Рис. 2

Оксид	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CuO	NiO	MoO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	TiO <sub>2</sub>	PbO
Энергия связи, кДж/моль	67	75	79	84	109	142	180	226	247	167

полупроводниками *p*-типа, оксиды с очень высокой энергией связи кислорода – диэлектриками, оксиды с промежуточными значениями – полупроводниками *n*-типа проводимости [18].

Для оксидов с прочносвязанным кислородом характерна наиболее устойчивая конфигурация внешней *d*-оболочки катиона:  $d^0$  (TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>),  $d^5$  (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),  $d^{10}$  (ZnO), менее устойчивые конфигурации катионов свойственны оксидам, энергия связи М–О для которых существенно ниже:  $d^3$  (MnO<sub>2</sub>),  $d^6$ ,  $d^7$  (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>),  $d^8$  (NiO),  $d^9$  (CuO). Неустойчивые электронные конфигурации  $d^8$ ,  $d^7$  свойственны также Pt<sup>2+</sup>, Pd<sup>2+</sup>, Rh<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, т. е. катионам тех металлов, которые характеризуются невысокими значениями теплот хемосорбции кислорода. Поскольку для катионов элементов главных подгрупп вообще более характерны стабильные структуры  $d^9$ ,  $d^{10}$ , то соответствующие материалы должны обладать высокой прочностью связи кислорода.

Для многокомпонентных оксидных систем, в тех случаях когда их отдельные компоненты химически взаимодействуют друг с другом при образовании соединения, энергия связи кислорода с поверхностью такого материала отличается от энергии М–О для отдельных компонентов и не складывается аддитивно из значений  $E_{M-O}$  для этих компонентов. В первом приближении можно считать, что величина  $E_{M-O}$  для шпинелей типа Me<sub>I</sub>(Me<sub>II</sub>)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> определяется в основном свойствами Me<sub>II</sub>. Так, значения  $E_{M-O}$  для ZnCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> близки к таковым для Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, значения  $E_{M-O}$  для NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, CdFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> аналогичны для Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В соединениях типа молибдатов, ванадатов, вольфраматов величина  $E_{M-O}$  определяется в основном значением  $E_{M-O}$  для MoO<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, WO<sub>3</sub> и т. д. Энергия связи поверхностного кислорода модифицированных оксидов (типа NiO с добавками Li<sub>2</sub>O) близка по значению  $E_{M-O}$  для этих оксидов, хотя и незначительно отличается от нее.

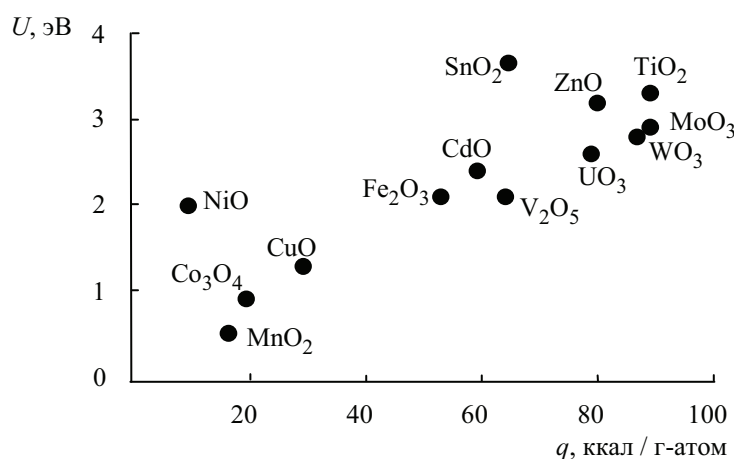


Рис. 3

В общем случае процесс детектирования восстанавливающего газа заключается в адсорбции молекул газа на поверхности оксида и последующем их окислении. Адсорбция молекулы газа на катион металла, который играет роль центра Льюиса, относится к ки-

слотно-основным реакциям. В этом случае катион металла выступает в роли кислоты (по Льюису, это вещество, которое может использовать неподеленную пару электронов атомов другой молекулы для образования устойчивой электронной группировки одного из своих атомов), а газ – в качестве основания (по Льюису, вещество, обладающее неподеленной парой электронов, которая может быть использована для образования устойчивой электронной группировки другого атома). Чаще всего такой устойчивой группировкой является электронный октет.

В теории Льюиса кислота и основание взаимодействуют друг с другом с образованием донорно-акцепторной (координационной) связи. В результате приобретения пары электронов атомом, ответственным за кислотные свойства, часто возникает завершенная электронная конфигурация. Современная электронная теория классифицирует кислоты и основания по типу орбиталей, принимающих участие в образовании межмолекулярных донорно-акцепторных связей в кислотно-основном комплексе. В образовании связей между кислотой и основанием участвуют наиболее высокая в энергетическом отношении граничная заполненная молекулярная орбиталь основания и наиболее низкая молекулярная орбиталь кислоты. Энергия координационной связи, как правило, ниже, чем энергия ковалентной связи. Это обстоятельство облегчает образование и участие координационно-связанных соединений в каталитических реакциях. Способность атома притягивать электронную пару характеризуется его электроотрицательностью, поэтому в реакции адсорбции молекул газа на поверхности оксида–полупроводника эффективнее участвуют атомы металлов, обладающие большей электроотрицательностью. Реакционная способность оксидов в кислотных реакциях зависит от электроотрицательности катиона металла  $M^{n+}$ :  $\chi = \chi_0(2n + 1)$ , где  $\chi_0$  – электроотрицательность Полинга;  $n$  – заряд иона.

Следующей стадией взаимодействия газа с оксидами металлов является окисление молекул газа хемосорбированным на поверхности оксида кислородом. Процессы каталитического окисления органических соединений делятся на два больших класса: полного (глубокого) окисления и неполного (мягкого, парциального) окисления. В полном окислении органические молекулы при взаимодействии с кислородом окисляются до конечных, термодинамически устойчивых молекул  $CO_2$  и  $H_2O$ . В органических соединениях при этом разрываются все связи C–H и C–C. К этому же классу относится окисление простых молекул  $SO_2$  и  $H_2S$  до  $SO_3$ ,  $CO$  до  $CO_2$ ,  $H_2$  до  $H_2O$ ,  $NH_3$  и  $NO$  до  $NO_2$ . Полное окисление промежуточных продуктов возможно на поверхности оксида, который характеризуется малой энергией связи кислорода с катионом металла.

Следует отметить, что в общем случае кислотно-основные и окислительно-восстановительные свойства поверхности оксида могут не коррелировать.

Таким образом, наличие центров двух типов, обладающих разными восстановительными и кислотно-основными свойствами, которые принимают участие в процессах адсорбции и окисления молекул газа, является одним из главных требований для достижения большой величины отклика детектирования газа.

Показано [19], что чувствительность композитных  $ZnO-SnO_2$  сенсоров значительно превышает чувствительность сенсоров, изготовленных лишь из оксида олова или цинка при одинаковых условиях эксперимента. При рассмотрении отклика  $ZnO-SnO_2$  к бутано-

лу, предложено, что бутанол более эффективно дегидрогенизуется в бутанал оксидом олова, но  $\text{SnO}_2$  относительно неэффективен в реакции каталитического разложения бутанала. С другой стороны, оксид цинка является эффективным катализатором разложения бутанала. С участием комбинации этих двух материалов бутанол эффективно дегидрогенизуется, а затем происходит его каталитическое разложение. Сравнение чувствительности  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO-In}_2\text{O}_3$  к этанолу показало, что чувствительность составов  $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$  превосходит чувствительность простых оксидов, а состав  $\text{ZnO-In}_2\text{O}_3$  имеет меньшую чувствительность по сравнению с простыми оксидами. На рис. 4 представлен отклик  $S$  простых оксидов и их композитов к 5 ppm этанола при 100 % относительной влажности, рассчитанный по формуле  $S = \frac{R_{\text{воздух}} - R_{\text{газ}}}{R_{\text{газ}}}$ ,

где  $R_{\text{воздух}}$  – сопротивление в атмосфере воздуха;  $R_{\text{газ}}$  – сопротивление в присутствии детектируемого газа. Эти данные подтверждают, что чувствительность композитного сенсорного материала увеличивается лишь в том случае, когда каталитическая активность компонентов композитов дополняет друг друга.

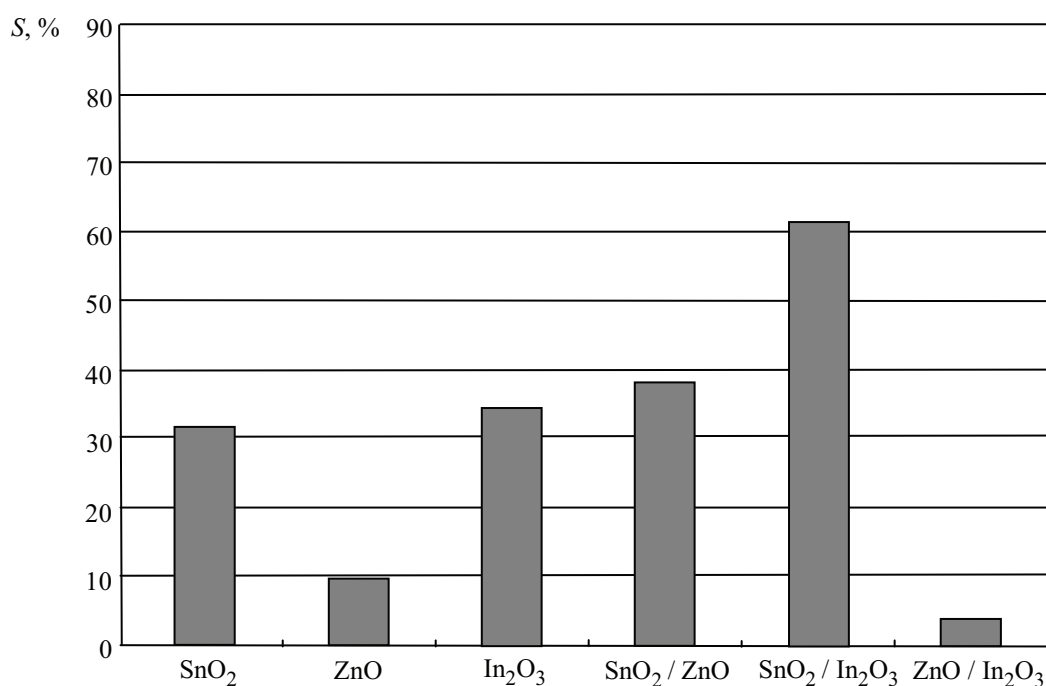


Рис. 4

На рис. 5 [20] схематично представлен механизм окисления метанола на оксидах металлов. На основе схемы взаимодействия молекул спирта с оксидами металлов и теории кислотно-основных и окислительно-восстановительных реакций предложен механизм адсорбции и окисления этанола двухкомпонентным оксидом металла.

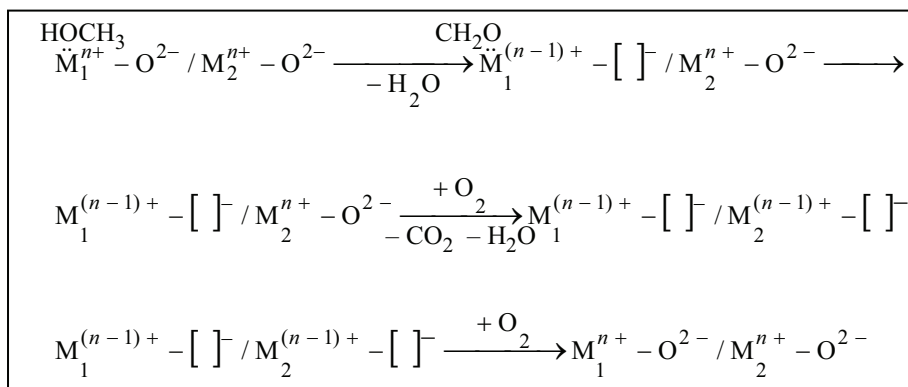
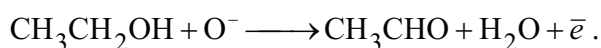
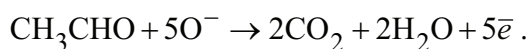


Рис. 5

Молекулы атмосферного кислорода хемосорбируются на поверхность оксида–полупроводника и заряжаются отрицательно, при этом в приповерхностной области полупроводника образуется область обедненного заряда. В соответствии со схемой окисления спирта, представленной в [20], молекула спирта адсорбируется на катион металла с большей электроотрицательностью с образованием химической координационной связи между атомом кислорода и катионом металла. Между молекулами спирта и оксида металла происходит реакция окислительной дегидрогенизации (парциальное окисление):



После этого координационная связь разрывается, и молекула ацетальдегида мигрирует на катион металла, обладающего меньшей электроотрицательностью, где происходит полное окисление ацетальдегида с участием молекулы оксида и хемисорбированного кислорода с выделением углекислого газа и воды:



При этом электроны возвращаются обратно в полупроводник, за счет чего происходит быстрое изменение его сопротивления, а на освободившиеся связи катионов металлов вновь адсорбируется кислород.

Таким образом, в статье проанализированы теоретические аспекты взаимодействия газов с оксидами металлов, рассмотрены основные особенности протекания кислотно-основных и окислительно-восстановительных реакций на поверхности оксидов металлов. Показано, что перспективным способом увеличения газочувствительности является использование двух- и многокомпонентных оксидов металлов, за счет наличия в таких материалах центров двух типов, обладающих разными восстановительными и кислотно-основными свойствами, которые принимают участие в процессах адсорбции и окисления молекул газа.

Работа проводилась при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», 2009–2013 гг. (ГК № П1249), стипендии Президента РФ для обучения за рубежом в 2010/11 учебном году и проекта по программе «УМНИК».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korotcenkov G. Metal Oxides for Solid-State Gas Sensors: What Determines Our Choice? // Materials Science and Engineering. 2007. Vol. 139. P. 1–23.
2. SnO<sub>2</sub> based gas sensitive sensor / A. S. Bakin, M. V. Bestaev, D. Tz. Dimitrov et al. // Thin Solid Films. 1997. Vol. 296, № 1–2. P. 168–171.

3. Формирование структуры газочувствительных слоев диоксида олова, полученных реактивным магнетронным распылением / Р. М. Вошилова, Д. П. Димитров, Н. И. Долотов и др. // Физика и техника полупроводников. 1995. Т. 29, № 11. С. 1987–1995.
4. Эллипсометрия как экспресс-метод установления корреляции между пористостью и газочувствительностью слоев диоксида олова / Д. Ц. Димитров, В. В. Лучинин, В. А. Мошников, М. В. Панов // Журн. техн. физики. 1999. Т. 69, № 4. С. 129–131.
5. Грачева И. Е., Максимов А. И., Мошников В. А. Анализ особенностей строения фрактальных нанокompозитов на основе диоксида олова методами атомно-силовой микроскопии и рентгеновского фазового анализа // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 10. С. 16–23.
6. Электронно-микроскопические исследования структуры газочувствительных нанокompозитов, полученных гидропиролитическим методом / М. В. Калинина, В. А. Мошников, П. А. Тихонов и др. // Физика и химия стекла. 2003. Т. 29, № 3. С. 450–456.
7. Dimitrov D. Tz., Lutskaia O. F., Moshnikov V. A. Control of defect in the gas-sensitive tin dioxide layers // Electron Technology (Warsaw). 2000. Vol. 33, № 1. P. 61–65.
8. Давыдов С. Ю., Мошников В. М., Федотов А. А. Адсорбция газов на полупроводниковых оксидах // Письма в «Журн. техн. физики». 2004. Т. 30, № 17. С. 39–45.
9. Автоматизированная установка для измерения газочувствительности сенсоров на основе полупроводниковых нанокompозитов / И. Е. Грачева, А. И. Максимов, В. А. Мошников, М. Е. Плех // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 3. С. 143–146.
10. Внутреннее трение в полупроводниковых тонких пленках, полученных методом золь-гель-технологии / А. С. Ильин, А. И. Максимов, В. А. Мошников, Н. П. Ярославцев // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, № 3. С. 300.
11. Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors / V. A. Moshnikov, I. E. Gracheva, V. V. Kuznezov et al. // J. of Non-Crystalline Solids. 2010. Vol. 356, № 37–40. P. 2020–2025.
12. Карпова С. С., Грачева И. Е., Мошников В. А. Об особенностях спектров полной проводимости сетчатых нанокompозитных слоев на основе диоксида олова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 4. С. 3–7.
13. Управляемый синтез тонких стекловидных пленок / И. А. Аверин, С. С. Карпова, В. А. Мошников и др. // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 1. С. 23–25.
14. Idriss H., Seebauer E. G. Effect of oxygen electronic polarisability on catalytic reactions over oxides // Catalysis Letters. 2000. Vol. 66. P. 139–145.
15. Henrich V. E., Cox P. A. The Surface Science of Metal Oxides. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
16. Крылов О. В. Катализ неметаллами: закономерности подбора катализаторов. Л.: Химия, 1967.
17. Сазонов В. А., Поповский В. В., Боресков Г. К. Масс-спектрометрический метод определения летучести кислорода над окисными катализаторами // Кинетика и катализ. 1968. Т. 9, № 2. С. 307–318.
18. Голодец Г. И. Гетерогенно-каталитические реакции с участием молекулярного кислорода. Киев: Наукова думка, 1977.
19. Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors / C. Wang, L. Yin, L. Zhang et al. // Sensors. 2010. Vol. 10. P. 2088–2106.
20. Gas-sensitive properties of thin film heterojunction structures based on Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites / M. Ivanovskaya, D. Kotsikau, G. Faglia et al. // Sensors and Actuators B. 2003. Vol. 93. P. 422–430.

S. S. Karpova

#### MECHANISM OF REDUCING GASES AND METAL OXIDES INTERACTION

*Main issues about sensing mechanism of metal oxide gas sensors are discussed. Some steps of reducing gases and oxide surface interaction and factors influencing on catalytic activity of materials in different reactions are considered. It is shown that presence of centers of two types having different oxidative-reductive and acid-base properties that participate in processes of adsorption and oxidation of gas molecules is essential requirement to achieve high sensor response.*

**Gas sensors, metal oxides, catalytic activity, acid-basic reactions, oxidative-reductive reactions**

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В УСКОРИТЕЛЕ

*Проведено сравнение эффективности вычислительных алгоритмов для расчета самосогласованной поперечной динамики сильноточного релятивистского электронного сгустка, используемого для возбуждения кильватерных полей в цилиндрической структуре с диэлектрическим заполнением и вакуумным каналом для пролета пучка. Показано, что алгоритм, основанный на точном аналитическом решении уравнений динамики релятивистского пучка под действием заданных сил, дает выигрыш перед численными методами интегрирования уравнений движения не только по точности, но и по скорости расчета. Работа поддержана грантами РФФИ и Минобрнауки России.*

**Кильватерное ускорение, релятивистский электронный пучок, динамика пучков, численное моделирование**

Кильватерное ускорение электронов на основе эффекта Вавилова–Черенкова в диэлектрических структурах линейных ускорителей является одним из наиболее перспективных методов ускорения частиц и интенсивно исследуется в последние годы.

Одной из основных проблем в реализации данного метода является удержание интенсивного электронного пучка внутри канала волновода и предотвращение оседания частиц на его стенку. Генерируемые электронным пучком в цилиндрическом волноводе кильватерные поля имеют как продольную составляющую, используемую для ускорения последующих электронных сгустков, так и радиальную компоненту, отклоняющую частицы пучка от оси волновода.

Для исследования динамики пучка применяют численные подходы, основанные на моделировании электронных пучков методом макрочастиц. Метод макрочастиц основан на разбиении фазового объема пучка на большое число непересекающихся элементарных объемов, движение каждого из которых отождествляется с движением одной макрочастицы с суммарным зарядом и массой частиц, входящих в этот объем.

Задача описания движения макрочастиц является самосогласованной: взаимное положение частиц в ансамбле влияет на создаваемое частицами поле, которое, в свою очередь, приводит к изменению их положения. Определяющее влияние на скорость и точность расчета динамики пучка на каждом шаге алгоритма оказывают процедура расчета полей, создаваемых ансамблем частиц, и процедура определения нового положения частиц под действием найденных сил. Определение нового положения частиц при их релятивистском движении сводится к решению системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{d(\beta_z \gamma)}{dt} = \frac{-eE_z(\zeta, t)}{m_e c}, \quad \frac{d(\beta_r \gamma)}{dt} = \frac{F_r(\zeta, t)}{m_e c},$$

где  $\beta_z = v_z/c$ ;  $\beta_r = v_r/c$ ,  $\gamma = (1 - \beta_z^2 - \beta_r^2)^{-1/2}$  – релятивистский фактор. Напряженность электрического поля и радиальная сила могут быть найдены как:



$$E_{zli} = \sum_{n,m} \psi_{E_{z n,m}} I_n(k_{r n,m} r(\zeta, t)) \int_0^{\zeta} f(\zeta_0) \cos(k_{z n,m} (\zeta - \zeta_0 - z_i)) I_n(k_{r n,m} r(\zeta_0, t)) d\zeta_0,$$

$$F_{rli} = -e \sum_{n,m} \psi_{F_{r n,m}} I_n'(k_{r n,m} r(\zeta, t)) \int_0^{\zeta} f(\zeta_0) \sin(k_{z n,m} (\zeta - \zeta_0 - z_i)) I_n(k_{r n,m} r(\zeta_0, t)) d\zeta_0 + F_f,$$

где  $\psi_{E_{z n,m}}$  – коэффициенты ряда, зависящие от геометрии, диэлектрической проницаемости волновода и начального положения заряда;  $\zeta = z - Vt$  – расстояние за сгустком;  $k_{z n,m} = 2\pi \nu_{n,m} / (\beta c)$  – продольная компонента волнового вектора кильватерной волны ( $\nu_{n,m}$  – собственные частоты волновода, зависящие от его геометрических размеров и диэлектрических свойств материала);  $z_i$  – координата центра  $i$ -го сгустка,  $F_f$  – внешняя фокусирующая сила.

Традиционно используемыми в алгоритмах расчета динамики пучков численными методами решения подобных уравнений являются перевод в разностную форму с точностью решения 1-го порядка (метод Эйлера) и метод Рунге–Кутты 2-го и 4-го порядков. В то же время указанная система дифференциальных уравнений допускает как относительно простое приближенное, так и более сложное точное аналитическое решение. Сравнение эффективности расчетов указанными методами является предметом исследования настоящей статьи.

Для описания движения пучка был использован усовершенствованный алгоритм [1]. В нем продольное и радиальное поля получаются путем интегрирования функции, описывающей поле излучения в точке  $z, r$  от точечного заряда, находящегося в точке, с координатами  $z_0, r_0$ , свернутой с функцией распределения заряда по длине сгустка. В каждый момент времени известна зависимость радиального смещения частиц сгустка  $r_0$  от  $z_0$ , которая используется для расчета поля. Для определения радиального смещения средней линии сгустка  $r(\zeta, t)$  производится его разбиение на цепочку макрочастиц. После нахождения новых координат макрочастиц получившаяся дискретная последовательность интерполируется для получения вновь функциональной зависимости  $r(\zeta, t)$ .

Для нахождения координат макрочастиц вдоль средней линии сгустка в последующий момент времени были проведены сравнительные расчеты на основе следующих алгоритмов:

1. Алгоритм Эйлера, использованный в [2].
2. Рунге–Кутты 2-го порядка, использованный в программе VBU-3000 [3], [4]:

$$y_{n+1} = y_n + (k_1 + k_2)/2,$$

$$k_1 = hf(x_n, y_n); \quad k_2 = hf(x_n + h, y_n + k_1).$$

3. Рунге–Кутты 4-го порядка, примененный в [1]. Формулы для алгоритма имеют следующий вид:

$$y_{n+1} = y_n + 1/6(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

$$k_1 = hf(x_n, y_n); \quad k_2 = hf(x_n + h/2, y_n + 1/2 k_1);$$

$$k_3 = hf(x_n + h/2, y_n + 1/2 k_2); k_4 = hf(x_n + h/2, y_n + 1/2 k_3).$$

4. Алгоритм, основанный на приближенных формулах:

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{F_z}{mc} dt, \quad r = r_0 + \frac{c^2}{a_r \gamma_1} \left( \sqrt{1 + v_1^2/c^2} - \sqrt{1 + v_0^2 \gamma^2/c^2} \right), \quad v_1 = a_r dt + v_0 \gamma.$$

5. Алгоритм, основанный на точном решении уравнения движения релятивистской частицы под действием постоянной силы [5]:

$$\beta_z(t) = \xi(t) / \sqrt{1 + \xi(t)^2 + \eta(t)^2}; \quad \beta_r(t) = \eta(t) / \sqrt{1 + \xi(t)^2 + \eta(t)^2},$$

где  $\beta_z = v_z/c$ ;  $\beta_r = v_r/c$ ;  $\xi(t) = a_z(\zeta)t + \beta_{z0}\gamma_0$ ;  $\eta(t) = a_r(\zeta)t + \beta_{r0}\gamma_0$ ;  $a_z(\zeta) = -eE_z(\zeta)/(m_e c)$ ;

$a_r(\zeta) = F_r(\zeta)/(m_e c)$ ;  $\gamma = (1 - \beta_z^2 - \beta_r^2)^{-1/2}$  – релятивистский фактор.

Радиальные координаты частицы находятся на основе следующего выражения:

$$r = r_0 + \frac{c}{a^3} \left[ a a_r \left( \sqrt{1 + \xi(t)^2 + \eta(t)^2} - \gamma_0 \right) + \gamma_0 \left( a_z^2 \beta_{r0} - a_r a_z \beta_{z0} \right) \ln |\delta| \right],$$

где  $a = \sqrt{a_z^2 + a_r^2}$ ;  $\delta = \frac{a^2 t + \gamma_0 (a_z \beta_{z0} + a_r \beta_{r0}) + a \sqrt{1 + \xi(t)^2 + \eta(t)^2}}{\gamma_0 (a_z \beta_{z0} + a_r \beta_{r0} + a)}$ .

Расчеты проводились для двухслойного диэлектрического линейного волновода с внешним радиусом  $R_w = 0.63$  см и внутренним радиусом  $R_c = 0.5$  см. В волновод помещались два сгустка. Начальная энергия первого сгустка  $W_d = 16$  МэВ. Заряд первого сгустка  $Q_1 = 49.5$  нКл, второго –  $Q_2 = 0.5$  нКл.

Расчет проводился до момента касания пучком стенок волновода. Количество макрочастиц, на которые разбивался пучок, составляло  $N_z = 20$ , что обеспечивало достаточную сходимость метода. Временной шаг рассчитывался в процессе вычислений таким образом, чтобы количество точек разбиения интервала времени до касания пучком стенки волновода было бы не менее заранее заданной величины  $N_T$ . В данном исследовании значение этой величины варьировалось от 10 до 150.

В процессе исследования в массив сохранялись радиальные координаты частиц. Для количественного сравнения эффективности алгоритмов проводилось их сопоставление с алгоритмом, основанным на точном аналитическом решении. В качестве количественного критерия было выбрано среднеквадратичное относительное отклонение, определяемое следующим образом:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_1 - y_0}{0.5(y_1 + y_0)} \right)^2,$$

где  $y_1$  – расчетное значение радиальной координаты согласно выбранному алгоритму;  $y_0$  – расчетное значение радиальной координаты согласно алгоритму, основанному на точном аналитическом решении.

Расчеты среднеквадратичного отклонения алгоритмов определялись при различных количествах разбиения интервала времени  $N_T$ : 70, 95, 125, 145.

На рис. 1, 2 представлена относительная сходимость алгоритмов (относительно точного аналитического решения, рассчитанного при том же  $N_T$ ) и их времени расчета  $t$  на компьютере с CPU Intel Pentium B950 2.1 GHz для выбранных  $N_T$ .

На основе проведенных вычислительных экспериментов было выявлено:

1. Несмотря на то, что алгоритм Рунге–Кутты 4-го порядка сходится быстро, время расчета для него в 4 раза превышает время расчета для алгоритма, основанного на точном аналитическом решении.

2. Алгоритм Эйлера сходится немного быстрее, чем алгоритм, основанный на приближенных формулах. Это связано с тем, что алгоритм Эйлера не учитывает изменение релятивистского фактора.

3. При  $N_T \geq 145$  все функции практически совпадают. Дальнейшее разбиение практически не дает существенных улучшений сходимости.

Причиной значительного выигрыша по времени расчета у алгоритма, основанного на точном аналитическом решении, является меньшее количество обращений в программе к блоку по расчету аксиальных и радиальных ускорений частиц. Силы, действующие на каждую частицу, определяются как суперпозиция ряда волноводных мод, генерируемых каждой из движущихся впереди нее макрочастиц, что требует наибольших временных затрат при расчете. При расчете ускорения в алгоритмах, основанных на точном аналитическом решении, приближенном аналитическом и алгоритме Эйлера, происходит одно обращение, для алгоритма Рунге–Кутты 2-го порядка – два обращения, для алгоритма Рунге–Кутты 4-го порядка – четыре обращения. Как следствие, время расчетов для алгоритмов Рунге–Кутты 2-го и 4-го порядков приблизительно в два и четыре раза превышает время расчета согласно одношаговым алгоритмам.

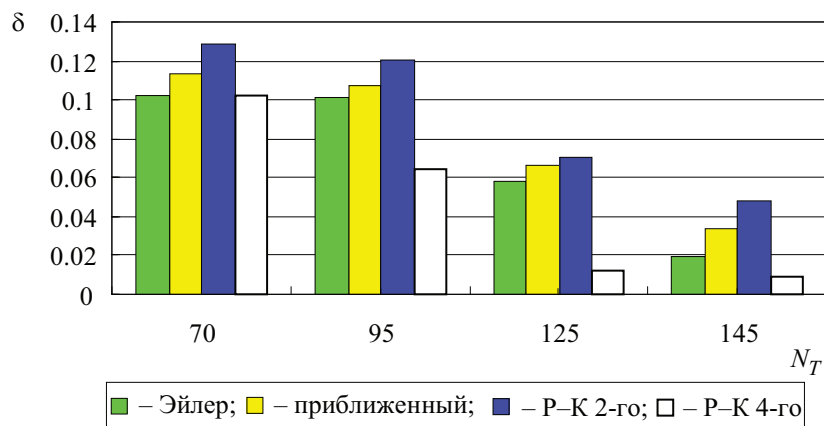


Рис. 1

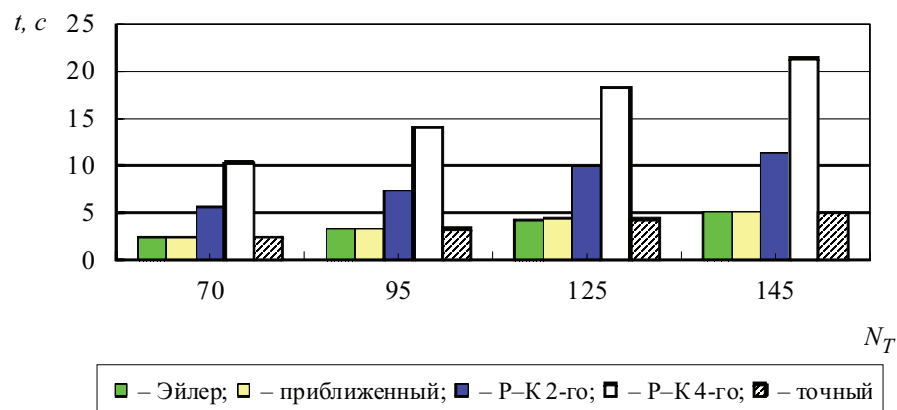


Рис. 2

Таким образом, для расчетов динамики наиболее предпочтительно использовать алгоритм, основанный на точном аналитическом решении уравнения движения релятивистской частицы под действием постоянной силы. Несмотря на относительную сложность расчетных соотношений, с этим алгоритмом по точности сопоставим лишь метод Рунге–Кутты 4-го порядка, но последний существенно проигрывает по времени расчета. По скорости алгоритм, основанный на точном решении, сопоставим с алгоритмом Эйлера и алгоритмом, основанным на приближенных формулах, однако эти алгоритмы существенно проигрывают ему по точности расчета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейнман И. Л., Канарейкин А. Д. Поперечная динамика и межгустковый энергообмен в ускорительной структуре с диэлектрическим заполнением // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 10. С. 103–109.
2. King-Yuen Ng. Single-Bunch Beam Breakup in a Dielectric-Lined Waveguide // Proceedings XVth International Conference on High Energy Accelerators (FERMILAB-Conf-92/212), Hamburg, Germany, July 20–24, 1992.
3. Beam Breakup Instabilities In Dielectric Structures / A. Kanareykin, C. Jing, P. Schoessow et al. // Proceedings of PAC07. Albuquerque, New Mexico, USA.
4. Beam Dynamics Simulation Platform and Studies of Beam Breakup in Dielectric Wakefield Structures / P. Schoessow, A. Kanareykin, C. Jing et al. // AIP Conf. Proc. 1299. 14th Advanced Accelerator Concepts Workshop, 13–19 June 2010, Annapolis (Maryland). P. 262–267.
5. Шейнман И. Л., Канарейкин А. Д. Определение параметров фокусирующей системы на основе анализа поперечной динамики пучка в диэлектрическом кильватерном ускорителе // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. Вып. 6. С. 10–14.

*I. L. Sheinman, P. S. Kirilin*

#### *COMPARISON OF COMPUTING ALGORITHMS EFFICIENCY FOR CALCULATION OF PARTICLE DYNAMICS IN THE ACCELERATOR*

*Comparison of efficiency of computing algorithms for calculation of self-coordinated transverse dynamics of the high-current relativistic electronic bunches is carried out. Electronic bunches are used for excitement of wake fields in cylindrical structure with dielectric filling and the vacuum channel for flight of a bunch. It is shown that the developed algorithm based on the exact analytical solution of the dynamics equations of a relativistic bunch under the influence of set forces, gives an advantage before numerical methods of integration of the movement equations not only on accuracy, but also till speed of calculation.*

*Work is supported by grants of the Russian Federal Property Fund and the Ministry of Education and Science of Russia.*

**Wakefield acceleration, electron beam, beam dynamics, numerical simulation**



УДК 681.5.017:66.08.012-52

*С. Е. Абрамкин, С. Е. Душин, А. В. Наседкин*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАССООБМЕННОГО ПРОЦЕССА В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ**

*Представлены математическая модель массообменного процесса в ректификационной колонне, дискретно-непрерывная модель и результаты компьютерного моделирования.*

**Математическая модель, дискретно-непрерывная модель, ректификационная колонна, массообмен, теплообмен, диэтиленгликоль, водяной пар, флегма**

На газовых промыслах для технологического процесса осушки природного газа в качестве абсорбирующего агента применяется диэтиленгликоль (ДЭГ). Так как это достаточно дорогостоящий химический реагент, то для восстановления его первоначальной концентрации в процессе абсорбционной осушки природного газа используется система «ДЕСОРБЦИИ абсорбента». В системе «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» ДЭГ подготавливается к повторному использованию. Основными аппаратами в системе «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» являются: ректификационная колонна (РК), испаритель (И) и аппарат воздушного охлаждения (АВО). В ранее опубликованных материалах по результатам проводимого научного исследования основное внимание уделялось математическим моделям (ММ) массообменных процессов в системе «АБСОРБЦИЯ газа» и теплообменных процессов в подсистемах «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение» системы «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» [1]–[3]. Цель данной статьи – показать результаты исследования ММ массообменного процесса в подсистеме «Ректификация».

В подсистеме «Ректификация» происходит процесс разделения растворов бинарных систем на один или два практически чистых компонента. Процесс разделения осуществляется путем многократного массообмена между движущимися противотоком парами и жидкостью в РК насадочного типа. При взаимодействии фаз происходит диффузия низкокипящего компонента из жидкости в пар и высококипящего компонента из пара в жидкость. Это обусловлено разностью концентраций компонентов в потоках паров и жидкости при массообменном процессе. Следует отметить, что основным условием эффектив-

ного массообмена между фазами в данном процессе является их максимально интенсивный контакт. Процесс в РК насадочного типа непрерывный. Поэтому для изучения статического режима работы РК принимается допущение, что в установившемся состоянии потока пара и жидкости, их концентрации, температуры и давления постоянны в каждой точке по высоте колонны и независимы от времени. Исследования как статике, так и динамики процесса ректификации достаточно широко известны в литературе [4]–[9]. Однако в проводимом исследовании основной задачей является изучение нестационарных (переходных) процессов, происходящих в РК, и их влияния на процесс осушки природного газа.

На рис. 1 приведена принципиальная схема полной РК, сверху которой отводится парожидкостная смесь, а снизу – частично регенерированный ДЭГ.

Насыщенный ДЭГ (НДЭГ) поступает в среднюю часть РК в двухфазном парожидкостном состоянии. Сечением ввода НДЭГа колонна разделяется на две части: верхнюю – укрепляющую часть и нижнюю – отгонную. На поверхности входного элемента насадки отгонной части РК кроме разделения парожидкостной смеси на жидкость и пар происходит еще и смешение потоков НДЭГа и флегмы, стекающей из нижней насадочной секции укрепляющей части РК. Паровой поток, выделившийся из НДЭГа на входе в РК, также смешивается с паровым потоком, поднимающимся из насадочной секции отгонной части РК. Смешение происходит в эвапорационном пространстве между выходом из насадочной секции отгонной части и входом в нижнюю насадочную секцию укрепляющей части РК.

В укрепляющей части РК создается встречный парам жидкий поток флегмы. Флегма выделяется из дистиллята, который образуется из пара в АВО (парциальный конденсатор).

В испарителе (парциальном кипятильнике), на котором установлена РК, за счет процесса однократного испарения влаги из ДЭГа создается встречный жидкости паровой поток. Паровой поток поступает в низ отгонной части РК.

Следует отметить, что отгонная и укрепляющая части РК могут работать и отдельно друг от друга. В таком случае их можно рассматривать как самостоятельные отгонную и укрепляющую колонны. Однако, во-первых, в данном процессе требуется получение в чистом виде только продукта отгонной части РК. Во-вторых, получение чистых компонентов парожидкостной системы в таких отдельных колоннах является экономически нецелесообразным из-за чрезмерно больших затрат энергии.

Если сравнивать отгонную и укрепляющую колонны, то легко увидеть определенную симметрию в характере их работы. Очевидно, что при повороте этих частей РК на  $180^\circ$  и замене потоков пара на потоки жидкости и наоборот наблюдается совпадение отгонной и укрепляющей частей. Также следует отметить, что при этом происходит замена процесса испарения на процесс конденсации. В связи с этим обстоятельством очевидно близкое сходство в математическом описании массо- и теплообменных процессов в отгонной и укрепляющей частях РК. Это позволяет объединить допущения, принимаемые для данных процессов.

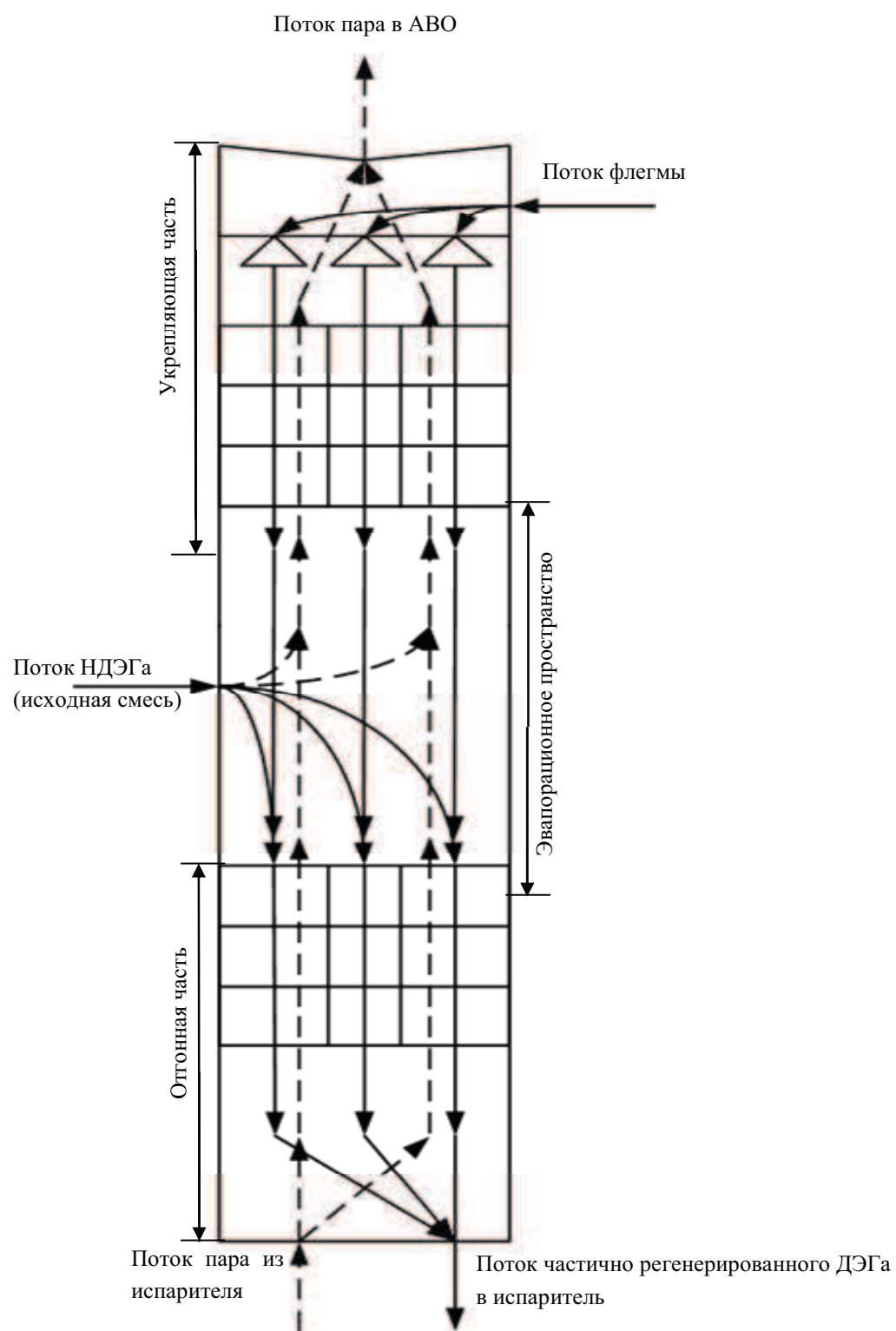


Рис. 1

Для составления ММ массообменного процесса в РК были приняты следующие допущения:

– жидкость (абсорбент, флегма) в насадках РК полностью перемешивается (модель идеального перемешивания);

- в основе получения ММ массообменных процессов между паром и жидкостью лежит гидродинамическая модель полного вытеснения (поршневого режима течения фаз);
- режим продольного перемешивания фаз отсутствует;
- скорости пара  $v_{\text{п}}$ , абсорбента  $v_{\text{а}}$  и флегмы  $v_{\text{ф}}$  одинаковы как по сечению колонны, так и по высоте насадочных секций РК;
- концентрации пара  $C_{\text{п}}$ , абсорбента  $C_{\text{а}}$  и флегмы  $C_{\text{ф}}$  одинаковы по сечению РК;
- массопередача на насадках эквимольная, т. е. через поверхность раздела фаз в противоположных направлениях переносится одинаковое количество целевого компонента;
- жидкость, проходя через насадку, не задерживается, что исключает образование зон простоя в насадках, а также исключается зависание жидкости в насадках;
- отгонная часть колонны работает в режиме испарения, укрепляющая – в режиме конденсации;
- зависимость равновесной концентрации целевого компонента в жидкости  $C_{\text{ц.п}}^{\text{р}}(C_{\text{ц.ж}})$  нелинейная в общем случае и линейная при аппроксимации.

Следует отметить, что процесс ректификации в данном случае протекает при вакууме и высокой температуре.

С учетом принятых допущений динамическая ММ массообменного процесса в РК может быть представлена системой дифференциальных уравнений в частных производных относительно концентраций целевого компонента по пару и жидкости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{\text{ц.п}}}{\partial t} &= v_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) \frac{\partial C_{\text{ц.п}}}{\partial z} + R_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) \left[ C_{\text{ц.п}} - C_{\text{ц.п}}^{\text{р}}(C_{\text{ц.ж}}) \right]; \\ \frac{\partial C_{\text{ц.ж}}}{\partial t} &= -v_{\text{ж}} \frac{\partial C_{\text{ц.ж}}}{\partial z} - R_{\text{ж}} \left[ C_{\text{ц.п}} - C_{\text{ц.п}}^{\text{р}}(C_{\text{ц.ж}}) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $C_{\text{ц.ж}}$ ,  $C_{\text{ц.п}}$  – концентрации целевого компонента (влаги) в жидкости (абсорбенте, флегме) и в паре;  $C_{\text{ц.п}}^{\text{р}}(C_{\text{ц.ж}})$  – равновесная концентрация целевого компонента в паре;  $v_{\text{ж}}$ ,  $v_{\text{п}}$  – скорости жидкости (абсорбента, флегмы) и пара;  $\theta_{\text{п}}$  – температура пара;  $R_{\text{ж}}$ ,  $R_{\text{п}}$  – коэффициенты, зависящие от физико-химических свойств фаз и геометрии аппарата.

В результате линеаризации по концентрации система уравнений (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{\text{ц.п}}}{\partial t} &= v_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) \frac{\partial C_{\text{ц.п}}}{\partial z} + R_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) (C_{\text{ц.п}} - E(\theta_{\text{п}}) C_{\text{ц.ж}}); \\ \frac{\partial C_{\text{ц.ж}}}{\partial t} &= -v_{\text{ж}} \frac{\partial C_{\text{ц.ж}}}{\partial z} - R_{\text{ж}} (C_{\text{ц.п}} - E(\theta_{\text{п}}) C_{\text{ц.ж}}), \end{aligned} \quad (2)$$

причем коэффициент фазового равновесия может быть аппроксимирован, например, полиномом  $E(\theta_{\text{п}}) = K_0 + K_1 \theta_{\text{п}} + K_2 \theta_{\text{п}}^2$ .

Следует отметить, что ММ (2) будет линейна только при постоянной температуре  $\theta_{\text{п}}$ .

Граничные условия для ММ (1), (2):

$$C_{\text{ц.п}}(z, t) \Big|_{z=0} = C_{\text{ц.п}}^{\text{вх}}(t), \quad C_{\text{ц.п}}(z, t) \Big|_{z=L} = C_{\text{ц.п}}^{\text{вх}}(t);$$



$$C_{ц.ж}(z, t)|_{z=l_k} = C_{ц.ж}^{ВХ}(t), \quad C_{ц.ж}(z, t)|_{z=0} = C_{ц.ж}^{ВЫХ}(t).$$

Начальные условия для ММ (1), (2):

$$C_{ц.п}(z, t)|_{t=0} = C_{ц.п}^0(z), \quad C_{ц.ж}(z, t)|_{t=0} = C_{ц.ж}^0(z).$$

Для исследования ММ (2) при помощи программного средства Matlab/Simulink осуществляется переход к дискретно-непрерывной ММ. Для исследования РК шаг дискретизации выбран произвольно равным трем ( $n = 3$ ):

$$\begin{aligned} \frac{dC_{ц.п1}}{dt} &= -\left(\frac{v_{п}(\theta_{п})}{h} + R_{п}(\theta_{п})\right)C_{ц.п1} + \frac{v_{п}(\theta_{п})}{h}C_{ц.п0} - R_{п}(\theta_{п})E(\theta_{п})C_{ц.ж3}; \\ \frac{dC_{ц.п2}}{dt} &= -\left(\frac{v_{п}(\theta_{п})}{h} + R_{п}(\theta_{п})\right)C_{ц.п2} + \frac{v_{п}(\theta_{п})}{h}C_{ц.п1} - R_{п}(\theta_{п})E(\theta_{п})C_{ц.ж2}; \\ \frac{dC_{ц.п3}}{dt} &= -\left(\frac{v_{п}(\theta_{п})}{h} + R_{п}(\theta_{п})\right)C_{ц.п3} + \frac{v_{п}(\theta_{п})}{h}C_{ц.п2} - R_{п}(\theta_{п})E(\theta_{п})C_{ц.ж1}; \\ \frac{dC_{ц.ж1}}{dt} &= -\left(\frac{v_{ж}}{h} - R_{ж}E(\theta_{п})\right)C_{ц.ж1} + \frac{v_{ж}}{h}C_{ц.ж0} - R_{ж}C_{ц.п3}; \\ \frac{dC_{ц.ж2}}{dt} &= -\left(\frac{v_{ж}}{h} - R_{ж}E(\theta_{п})\right)C_{ц.ж2} + \frac{v_{ж}}{h}C_{ц.ж1} - R_{ж}C_{ц.п2}; \\ \frac{dC_{ц.ж3}}{dt} &= -\left(\frac{v_{ж}}{h} - R_{ж}E(\theta_{п})\right)C_{ц.ж3} + \frac{v_{ж}}{h}C_{ц.ж2} - R_{ж}C_{ц.п1}. \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 2 представлена структурная схема ММ массообменного процесса в РК.

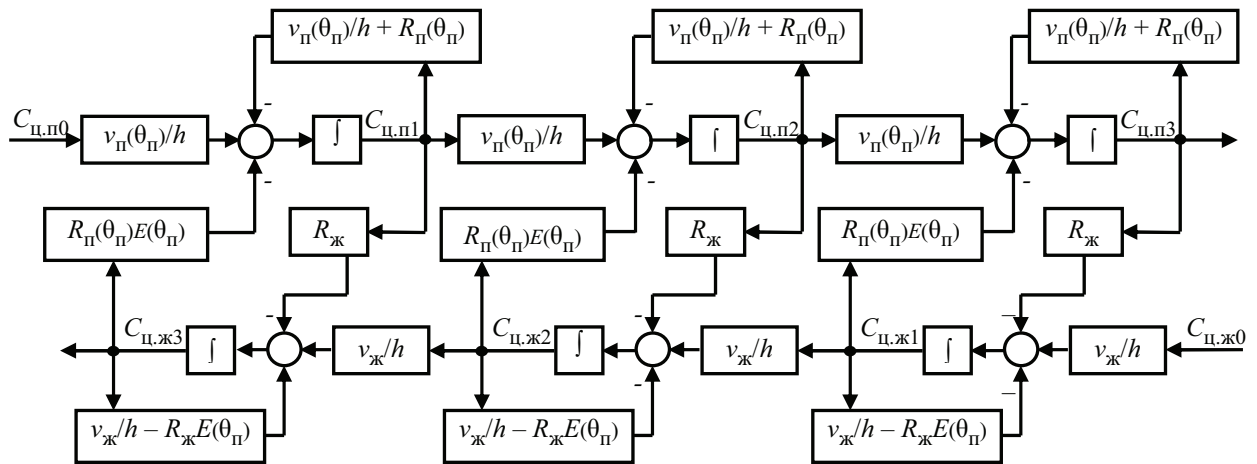


Рис. 2

В данной статье приводятся результаты исследования массообменного процесса в укрепляющей части РК. Исследование процесса в Simulink проводилось явным методом Рунге-Кутты 2-го и 3-го порядков в модификации Bogacki-Shampine (ode23) при автоматически изменяющемся шаге. Возмущение подавалось по изменению концентрации целевого компонента (влаги) в паровой фазе в пределах от 0,4 до 0,65 мольных долей. Графики переходных процессов при скачкообразном снижении концентрации целевого компонента с 0,53 до 0,4 представлены на рис. 3.

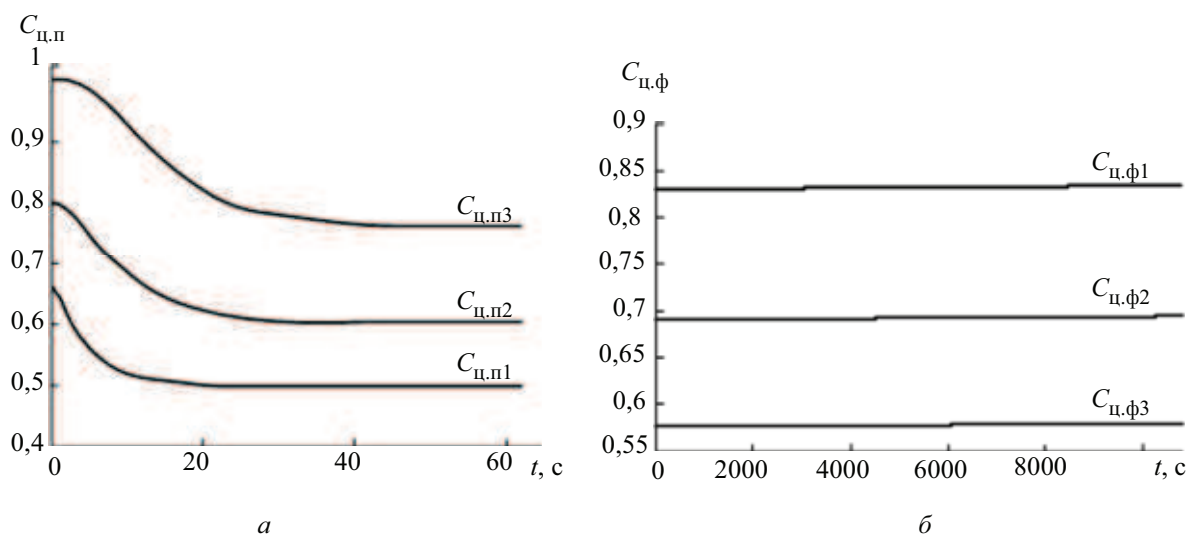


Рис. 3

Графики на рис. 3 показывают переходные процессы в укрепляющей части РК при снижении концентрации целевого компонента (влаги) в паре на 13 %. Оно может возникнуть в следующих случаях:

- 1) снизилось количество исходной смеси (НДЭГа), поступающей в колонну;
- 2) изменился состав исходной смеси (НДЭГа).

Снижение количества исходной смеси отражается на содержании целевого компонента не только во флегме, но и в ДЭГе, выходящем из отгонной части РК. Изменение состава НДЭГа влечет за собой изменение состава и температуры жидкости и паров в РК.

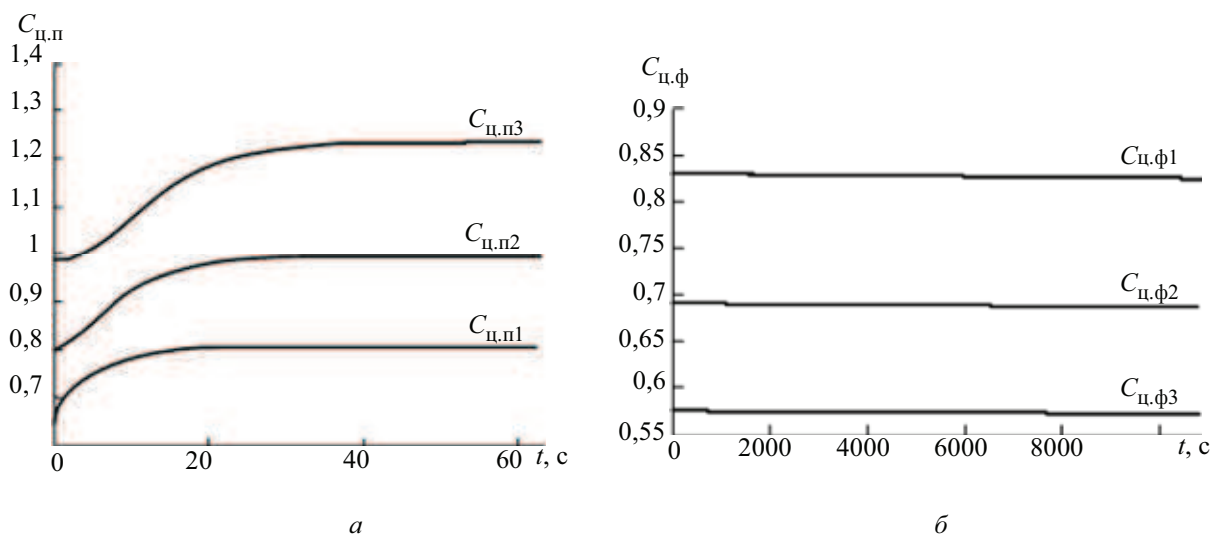


Рис. 4

Графики переходных процессов, приведенные на рис. 4, соответствуют росту целевого компонента в паре на 12 %. Такая ситуация характерна и для двух ранее перечисленных случаев. Однако следует отметить, что при увеличении количества НДЭГа содержание влаги во флегме растет, что влечет за собой увеличение влаги в ДЭГе, выходящем из отгонной части РК в испаритель. Также при этом изменяются температура и давление в РК.

Графики переходных процессов, приведенные на рис. 3 и 4, отражают ситуации нарушения технологического режима работы РК. Подобные ситуации устраняются при введении управляющего воздействия по жидкой фазе, так как паровая фаза не является непосредственно управляемой.

В заключение следует отметить, что в РК температурные профили пара и жидкости по всей высоте колонны не постоянны, поэтому в настоящее время планируется объединить модели массо- и теплообменного процессов, происходящих в РК, для проведения вычислительного эксперимента. Массо- и теплообменные процессы в РК взаимосвязаны, однако для создания системы автоматического регулирования (САР) приоритетным является регулирование теплообменных процессов. На газовых промыслах САР РК состоит в основном из контуров регулирования температуры в испарителе и в верху укрепляющей части РК. При разработке САР температуры в РК следует учитывать, что массообменные процессы между жидкостью (абсорбентом, флегмой) и парами происходят с учетом транспортного запаздывания, т. е. с учетом инерционности РК. Очевидно, что при изменении состава жидкости, вследствие инерционности РК, составы фаз изменятся раньше, чем изменится температурный профиль. Поэтому в САР температуры в испарителе следует учитывать корректирующее воздействие от датчика, измеряющего состав регенерированного абсорбента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Разработка математической модели технологического комплекса «Абсорбция – Десорбция» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 1. С. 29–33.
2. Абрамкин С. Е., Грудяева Е. К., Душин С. Е. Система регулирования теплообменного процесса в аппарате воздушного охлаждения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 6. С. 35–40.
3. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Поляшова К. А. Математическая модель управляемого теплообменного процесса в испарителе // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 9. С. 32–36.
4. Анисимов И. В. Автоматическое регулирование процесса ректификации. 2-е изд., доп. М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефт. и горно-топлив. пром-сти, 1961.
5. Альбом математических описаний и алгоритмов управления типовыми процессами химической технологии. Вып. 2. Гидродинамические модели потоков, процессы ректификации в аппаратах с насадкой, процессы экстракции в аппаратах с насадкой. Руководящие технические материалы ОКБА / В. В. Кафаров, В. П. Плютто, В. Л. Перов и др./ НИИТЭХИМ. М., 1967.
6. Багатуров С. А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. 3-е изд., перераб. М.: Химия, 1974.
7. Тараненко Б. Ф., Герман В. Т. Автоматическое управление газопромысловыми объектами. М.: Недра, 1976.
8. Протождяконов И. О., Муратов О. В., Евлампиев И. И. Динамика процессов химической технологии: Учеб. пособие для вузов. Л.: Химия, 1984.
9. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учеб.: В 2 кн. / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов и др.; Под ред. В. Г. Айнштейна. М.: Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006.
10. Наседкин А. В., Уткин М. А., Федоров М. С. Перспективные направления развития средств автоматизации управления технологическими процессами // Автоматизация и управление в лесопромышленном комплексе. 1998. № 1.

*S. E. Abramkin, S. E. Dushin, A. V. Nasedkin*

#### *MATHEMATICAL MODEL OF THE MASS EXCHANGE PROCESSES IN RECTIFYING COLUMN*

*The continuous and discrete-continuous mathematical models of the mass exchange processes and the results of computer simulation are worked out.*

**Mathematical model, discrete-continuous model, rectifying column, mass exchange, heat exchange, diethylene glycol, water vapor, phlegm**

## ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

*Проанализирован типовой процесс выполнения проекта тепловой сети, обоснована необходимость автоматизации типовых процедур, а также операций, требующих максимальных временных затрат.*

### **Чертеж, проектирование, тепловая сеть, трубопровод, AutoCAD, проблемы автоматизации**

Тепловая сеть – это система трубопроводов (теплопроводов) централизованного теплоснабжения, по которым теплоноситель (горячая вода или пар) переносит тепло от источника (котельной) к потребителям и возвращается обратно к источнику. Она является совокупностью устройств (включая центральные тепловые пункты, насосные станции), предназначенных для передачи тепловой энергии, теплоносителя от источников тепловой энергии до потребляющих тепло установок. Проектирование *наружных* сетей представляет собой сложный многоступенчатый процесс выполнения чертежной документации. Как и любая инженерная система, сеть состоит из множества связанных частей, каждая из которых требует прорисовки с подробными пояснениями, за исключением случаев, когда используется стандартная деталь или сборка, параметры которой содержатся в нормативных документах.

Работа ведется «сверху вниз», т. е. сначала разрабатывается общая концепция проекта, которая задает характеристические особенности элементов. При этом, по тем или иным причинам, диктуемым требованиями локальной специфики трассы к отдельным участкам, первоначальный вариант работы частично или полностью претерпевает изменения. Таким образом, несмотря на выраженную иерархию, означающую последовательность задач, большая часть проектной документации выполняется параллельно.

Учитывая гетерогенность земли как рабочего пространства, проект можно рассматривать как многокритериальную задачу совокупного упорядоченного размещения набора заданных объектов в пространстве, определяемого некими критериями, в роли которых выступают технические особенности, ГОСТ, СНиП.

**Типовой проект** тепловой сети включает в себя следующие документы:

- План трассы – чертеж в масштабе 1:1 наподобие карты, изображающий трассу вместе со всеми расположенными на отдельно взятом участке коммуникациями, постройками, особенностями рельефа. Как правило, план трассы выполняется на основе съемки местности, получаемой от треста геодезических работ и инженерных изысканий (ГРИИ). На него наносятся сети, существующие на данный (определенный) момент времени.

- Продольный профиль трассы – вертикальный разрез изображенной на плане трассы с представленными элементами трубопровода и указанными отметками осей, земли и т. д. Этот документ создается в масштабе 1:500 по горизонтали и 1:50 по вертикали. При необходимости выполняется еще один профиль, «профиль выпусков», на который наносятся выпуски трассы и продольного дренажа.

- Монтажная схема – максимально детализированное и при этом максимально сжатое по размеру схематичное отображение изображенного на плане трассы чертежа, выполняемое без соблюдения масштаба. Эта схема используется непосредственно строителями, что и определяет необходимость компактного ее представления.

- Узел теплофикационный (тепловая камера) – подробный чертеж камеры в двух проекциях (план + проекция по усмотрению) с указанием всего необходимого оборудования в спецификации.

- Узел внекамерной врезки – вариант замены тепловой камеры в месте присоединения ввода к основной сети в случае, если теплофикационный узел не может быть установлен или необходимо снизить стоимость строительных работ.

- Узел воздушников – один из необходимых технологических элементов сети, отвечающий за поддержание баланса давления при опорожнении трубопровода. Зачастую располагается внутри тепловой камеры, однако может выполняться в виде отдельного узла.

- План и монтажная схема временной тепловой сети – временная трасса строится для подключения пользователей во время выполнения работ. Выполняется в соответствии с правилами построения основных чертежей.

- Спецификация – полный список материалов, использованных при строительстве, куда входят не только техническая часть проекта, но и работы по восстановлению благоустройства и дорожного покрытия.

- ВР (ведомость объемов работ) – таблица, состоящая из списка и объема работ, необходимых при строительстве.

***Входные данные***, необходимые для выполнения проекта.

После получения технического задания от заказчика исполнителю требуется набор документов для выполнения проекта. В случае нового строительства документы определяют условия подключения, а при реконструкции существующей трассы это исполнительная документация (набор чертежей, по которым выполнялся текущий проект, с поправками, внесенными строителями при монтаже, если таковые были). В набор входят план трассы, монтажная схема и чертежи теплофикационных узлов.

Кроме исполнительной документации необходима текущая съемка местности, предоставляемая, как указывалось ранее, трестом ГРИИ, который занимается сведением и систематизацией всех проектов в единую сеть, поскольку различного рода коммуникации проектируются и прокладываются разными организациями. В Санкт-Петербурге это «Водоканал», «Кабельная сеть», «Петербург Газ», организация по благоустройству территорий («Центр комплексного благоустройства» – ЦКБ) и другие эксплуатационные организации (например, «Тепловые сети» и ГУП ТЭК), которым могут принадлежать отдельные теплые сети. На плане ГРИИ также размещены все существующие здания, растения (посадка которых была регламентирована) и рельеф местности. Кроме съемки выдается экспликация, которая содержит список промежуточных и дренажных колодцев, тепловых камер, а также узлов остальных коммуникаций с их отметками (высотные отметки относительно нуля балтийской системы отсчета).

*Процесс выполнения проекта.* После получения ТЗ и всех исходных данных начинается этап проектирования [см. лит.]. Во-первых, при необходимости (если данные не были указаны) требуются расчет гидравлики для определения диаметра трубопровода и результаты геологического исследования, чтобы определить степень нужности дренажной системы трубопровода.

Далее выполняется этап определения (пробивки) маршрута основной сети. Идеальным случаем является вариант при реконструкции, когда можно пройти по маршруту уже существующей сети, что экономит не только время на проектирование, но и трудозатраты при монтаже. Однако, как правило, за существующую зону приходится выходить.

Трасса прокладывается одновременно на плане и профиле. При этом по плану проверяют, чтобы сеть не выходила за зону проектирования, т. е. проходила вне охранной зоны других коммуникаций, зданий, растений, а также элементов благоустройства, а по профилю – чтобы проектируемая трасса не пересекала прочие коммуникации «по вертикали».

В земле трасса зажата между неподвижными опорами, бетонными щитами, которые являются направляющими конструкциями. Тут следует упомянуть о физических свойствах трубопровода. Металл, в том числе и стальные трубы, при термическом воздействии расширяются и сжимаются, что, по сути, является недопустимым ввиду недостаточной пластичности материала. Исходя из этого, необходимо предусмотреть компенсацию «перемещений» трубы. Компенсация бывает двух типов: самокомпенсация и сильфонная. При первом типе трубопровод уравнивает смещения за счет своей конфигурации, а при втором – за счет специальных устройств. При этом на каждом отдельно взятом участке трассы, ограниченном опорами с обеих сторон, должен присутствовать только один вид компенсации. Перемещения естественно создают определенную нагрузку на трубопровод, фасонные изделия и неподвижные опоры, поэтому для выполнения проекта необходимо проводить все соответствующие расчеты. Ввиду важности отрасли и опасности возникновения аварий необходимые формулы были формализованы, чтобы проектировщик мог выполнить все операции без детальных знаний в области «сопротивления материалов». При этом в большей степени расчеты выполняются вручную по большому числу табличной информации и данных проекта.

Разумеется, существует несколько способов автоматизации процесса разработки, каждый из которых по-своему полезен. Минусом существующего набора средств является гетерогенность, поскольку в качестве «подручных средств» используются продукты разных производителей, что в отдельных случаях просто затрудняет работу, а в иных же приходится выполнять одну операцию несколько раз.

*Создание чертежей.* Фирма Autodesk выпускает целую линейку узконаправленных продуктов, которые учитывают специфику этой конкретной отрасли. Кроме того в наборе стандартных средств содержатся палитры динамических блоков с условными обозначениями элементов будущего чертежа. Так как система AutoCAD этой фирмы выпускается в США, то используются обозначения, принятые ISO, а не ГОСТ. Кроме того, в случае, если в нормативных документах не описана форма представления соответствующей детали трассы, то каждый исполнитель выполняет ее по-своему. Это делает применение специализированных продуктов бесполезным, а в ряде случаев и дорогостоящим.

Специфика работы определяет необходимость выполнения чертежей по наружным тепловым сетям в двумерном пространстве (для получения полной картины проекта используется план и профиль). Поэтому зачастую для работы над проектом используются только базовые средства и инструменты САПР, дополняемые в ряде случаев блоками. Для проектирования центральных и индивидуальных тепловых пунктов, когда инженер работает с пространством, ограниченным границами здания, используются трехмерные модели. Для этого чаще всего используется редактор Microstation, однако в 2012 г. Autodesk выпустил продукт Plant3D, направленный на проектирование систем, состоящих из труб. Этот продукт в значительной степени облегчил рабочий процесс по сравнению с конкурентом, но не обеспечил его полной автоматизации.

*Составление спецификаций* – один из самых важных этапов работы над чертежом, учитывая вероятность возникновения ошибок ввиду человеческого фактора. Как правило, спецификации составляются вручную. Только в AutoCAD 2009 появилась возможность более удобной работы с таблицами, наподобие программы Excel, так как до этого времени в ряде случаев таблицы составлялись при помощи графических примитивов.

*Выполнение расчетов.* На российском рынке существует одна программа, расчетные данные которой (без предоставления собственно расчета) принимают государственные экспертные организации и заказчики, – это «Старт». За почти полувековую историю командой разработчиков был накоплен большой опыт в применении различных методик моделирования на основе актуальных ГОСТ и расчетной документации. Программа является 3D-редактором с набором стандартных для России элементов, необходимых для создания модели проекта, после чего расчетный модуль анализирует ее и, в случае обнаружения ошибок или недопустимых показаний, сообщает о необходимости внести изменения. С ее помощью тепловые расширения и прочие перемещения можно наглядно анимировать. Важной особенностью является способность программного продукта рассчитывать циклические нагрузки, обусловленные нормативным числом пусконаладочных работ в процессе профилактики и эксплуатации сети. Ниже приведен список характеристик трубопровода, которые «Старт» может обработать:

- надземные, подземные в канале и с участками, заземленными в грунте;
- плоские, пространственные, разветвленные, с замкнутыми контурами;
- с различными конструкциями концевых и промежуточных опор;
- подверженные разнообразным внешним воздействиям (температурное расширение, сосредоточенные и распределенные нагрузки, смещение опор, предварительная растяжка, распор от внутреннего давления и т. д.);
- работающие при низких и высоких температурах (учитывается эффект ползучести и релаксации напряжений согласно нормам);
- с внутренним избыточным давлением и наружным давлением (вакуум) – для таких участков проверяется местная устойчивость стенок.

Программа позволяет преобразовать данные расчета в удобный формат, а саму схему сохранить как файл .dwg. Однако получаемый чертеж не удовлетворяет соответствующим требованиям ЕСКД и нуждается в значительных доработках, а зачастую и в повторной прорисовке схемы. Также отсутствует возможность экспортирования чертежей .dwg в программу «Старт».

Анализ проектирования тепловых сетей и выявленные в связи с этим проблемы позволяют считать (сделать вывод), что в настоящее время наиболее важные направления повышения эффективности этого процесса должны быть в первую очередь связаны с ростом эффективности автоматизации составления спецификаций и с выполнением чертежей тепловых сетей.

*Повысить эффективность составления спецификаций* можно за счет автоматизации обработки информации, содержащейся в чертеже трассы в виде используемых в ней конструктивных элементов. Для этого необходимы автоматический способ сбора информации о деталях, расчет их количества и сведение полученных данных в таблицу. Наиболее простой вариант – создание палитры динамических блоков с указанием свойств элемента, которые будут автоматически извлекаться, после чего будут заполняться поля спецификации. Можно также создать базу с информацией об используемых единицах, а при формировании чертежа присваивать блокам уникальные имена, по которым из базы будут извлекаться конкретные данные для дальнейшей обработки и составления спецификаций. Альтернативным способом является размещение информации в атрибутах блока, что позволяет быстро и просто редактировать «обозначения» изделий, однако этот вариант допускает вероятность появления ошибки из-за человеческого фактора. Решать данный вопрос следует непосредственно с конструкторами – конечными пользователями такой программы.

*Для повышения эффективности формирования чертежей* тепловую сеть удобно условно разделить на прямолинейные участки трассы между неподвижными опорами, за исключением случаев, когда используются гофрированные гибкие трубы, при построении которых можно применять типовые решения. Эти участки можно рассчитывать специализированным параметрическим программным модулем. Так, например, при работе с планом трассы пользователь по выбору может указать способ компенсации участка, задать направление и прочие параметры, по которым подпрограмма выполнит процесс визуализации автоматически. Одновременно с этим можно рассчитать нагрузки на тот или иной элемент трубопровода, указать пользователю граничные и рекомендуемые параметры конфигурации, а также необходимость усиления врезок. Расчеты можно обеспечить и на уже нарисованных участках трассы.

Как было описано, план и профиль являются различными проекциями трубопровода, следовательно, они имеют одинаковые размерности и принципиальное расположение своих составляющих. Способ автоматизации построения профиля состоит в возможности записи длин участков трассы, чтобы потом, задав этим участкам необходимые для работы сети уклоны, построение могло быть выполнено автоматически. Кроме проектируемой сети на чертеже должны быть нанесены пересекаемые коммуникации, которые, как правило, предоставляются в виде таблицы Excel, следовательно, обработав данные, их также можно нанести автоматически. Сбор координат может быть осуществлен конвертированием линий в полилинии с дальнейшим сбором координат вершин и соответствующим расчетом длин участков сети. Профиль должен содержать информацию не только о длинах участков, но и об отметках сети в характер-



ных точках, т. е. точках излома/изменения угла наклона, которые также регламентируются нормами. Следовательно, имея отметки всех существующих пересечек, можно алгоритмически описать способ автоматического построения ломаной линии между двумя точками используя методы оптимизации.

В настоящее время на кафедре САПР ведется работа по автоматизации указанных этапов проектирования тепловых сетей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / Под ред. А. А. Николаева. М.: Изд-во литературы по строительству, 1965.

*A. O. Sinkov, Y. T. Lyachek*

*PROBLEMS OF AUTOMATION THE PROCESS OF DESIGNING THERMAL NETWORKS*

*In the article is analyzed a typical process of designing thermal network, justified the necessity of automation of routine procedures and operations that require the maximum time-consuming.*

**Drawing, design, thermal network, pipeline, AutoCAD, problems of automation**

УДК 621.3.049.77.001.2

*С. Э. Миронов, А. Ю. Васильев*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ ЯЧЕЕК МАКРОБЛОКА ПО ГАБАРИТАМ И ПОЛОЖЕНИЮ ВЫВОДОВ**

*Рассматриваются вопросы оптимизации процесса автоматизированного проектирования регулярных макроблоков СБИС.*

**Макроблоки СБИС, матричный делитель, технологически инвариантное иерархическое проектирование, сжатие топологии, системы автоматизированного проектирования**

*Технологически инвариантное проектирование топологии регулярных макроблоков СБИС. В основе технологии проектирования современной элементной базы лежит модульный принцип разработки СБИС, в соответствии с которым современные интегральные схемы собираются из больших фрагментов, называемых макроблоками.*

Статья посвящена оптимизации процесса автоматизированного проектирования регулярных макроблоков, собираемых из заказных специализированных ячеек с оптимизированной топологией, при разработке которых применяется изоэдренное топологическое проектирование, позволяющее даже при незначительном уменьшении размеров матрицируемых ячеек существенно снизить аппаратные затраты за счет большого их количества.

Основными этапами проектирования топологии иерархических макроблоков СБИС являются разработка библиотеки ячеек и сборка на ее основе топологии макроблоков.

Технология разработки библиотеки в соответствии с современными тенденциями в микроэлектронике предполагает возможность настройки проекта на любые проектные нормы. Эта технологическая инвариантность достигается с помощью систем сжа-

тия топологии, минимизирующих расстояние между элементами в соответствии с проектными нормами и задаваемыми разработчиком ограничениями на расположение отдельных частей топологии.

При разработке библиотеки сначала в графической среде системы проектирования [1] создаются технологически инвариантные описания топологии ячеек. Затем (в процессе настройки на задаваемые разработчиком проектные нормы) на базе этой виртуальной библиотеки создается библиотека реальных ячеек, из которых и собирается топология макроблока.

*Согласование топологии ячеек макроблока по габаритам и положению выводов.* При настройке на проектные нормы осуществляется согласование топологии ячеек по габаритам и положению выводов. Выполняется оно в несколько этапов [2]. Сначала ячейки подвергаются сжатию с учетом только технологических проектных норм. Из полученных описаний топологий извлекается информация о габаритах и координатах выводов ячеек, на основании которой вычисляются значения габаритов и координат выводов, позволяющие состыковывать топологии отдельных ячеек, объединяя их в макроблоки. После этого сжатие повторяется с учетом не только проектных норм, но и полученных на предыдущем этапе дополнительных ограничений на взаимное расположение элементов топологии ячеек. При этом для обеспечения максимальной плотности упаковки данный процесс нужно осуществлять итерационно [2], начиная с «нижних» выводов, поэтапным сжатием топологии, определением положения очередных выводов стыкуемых ячеек, выбором максимального из полученных значений и повторением сжатия с использованием найденного значения в качестве еще одного очередного ограничения на взаимное расположение элементов стыкуемых ячеек.

В результате получается библиотека плотноупакованных ячеек в заданных проектных нормах, которую можно использовать для проектирования крупных блоков БИС, подставляя полученные описания топологии и значения габаритов и координат выводов в файлы, описывающие топологии макроблоков на языке описания топологии CIF.

Распространение метода итерационного согласования выводов и габаритов ячеек на произвольное число ячеек позволило существенно упростить и ускорить процесс иерархического проектирования макрофрагментов СБИС, обеспечивая автоматическое согласование целых строк и столбцов разнотипных стыкуемых ячеек, которое было проиллюстрировано в [3] на примере параметризованного по разрядности данных технологически инвариантного компилятора матричного делителя.

*Характер связей между ячейками макроблока и типы алгоритмов согласования положения выводов и габаритов ячеек.* Связи между ячейками макроблока можно разделить на две группы. К первой относятся собственно «межъячеечные» связи – связи между двумя соседними ячейками (рис. 1, а), а ко второй – «сквозные» связи, проходящие ячейки (или ячейку) насквозь (рис. 1, б). Естественно, что в топологии одного макроблока могут встречаться связи разного типа.

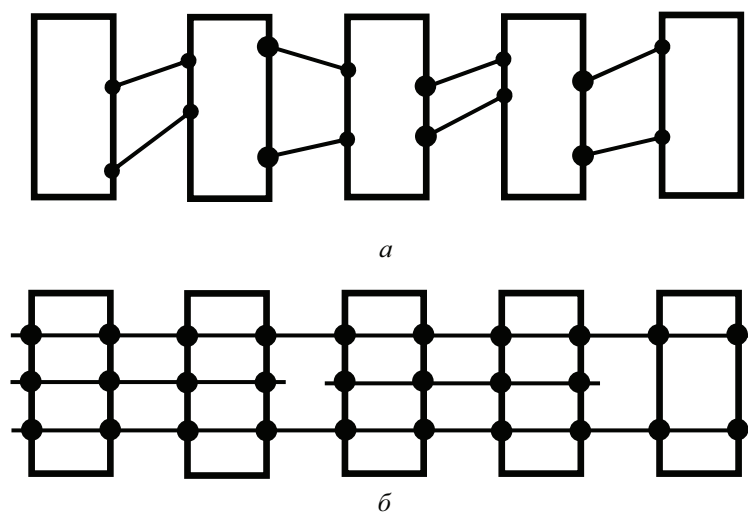


Рис. 1

Для сквозных связей положение выводов определяется «параллельно» – одновременно без итерационных согласований как максимальная из координат выводов, через которые проходит сквозная шина. Примером таких шин могут, например, служить шины, передающие в матрицу умножителя с группировкой разрядов множителя сигналы, управляющие работой элементов умножения, в качестве которых выступают мультиплексоры.

Процесс согласования координат выводов, соединенных «межъячеечными» связями, должен выполняться «последовательно» – поэтапно с учетом очередных изменений положения выводов в соседних ячейках. При этом могут возникать ситуации, требующие «возврата» к ранее согласованным выводам соседних ячеек для коррекции их положения.

*Оптимизация согласования топологии ячеек макроблока по габаритам и положению выводов.* Процесс согласования топологии ячеек предполагает действия по выявлению характера связей между ячейками и по собственно согласованию положения выводов и границ (согласованию габаритов) ячеек.

Связи очередного яруса разделяются на группы сквозных и межъячеечных связей, после чего к ним применяются процедуры согласования.

Граничные ячейки групп или не связаны друг с другом, или связаны межъячеечными связями, и согласование их выводов соответственно или не требуется вообще, или выполняется в соответствии с «последовательным» алгоритмом.

Как уже отмечалось, этот процесс осуществляется итерационно и существенно влияет на время генерации топологии кремниевым компилятором.

Сократить время работы компилятора удалось благодаря разработке алгоритма поиска оптимальной последовательности согласования положения выводов и габаритов ячеек и соответствующих программных средств.

Число согласуемых ячеек	Число этапов согласования «одного яруса» выводов ячеек	
	Неоптимальная последовательность согласования	Оптимальная последовательность согласования
2	1	1
3	3	2
4	6 (рис. 2, а)	3 (рис. 2, б)
5	10	4

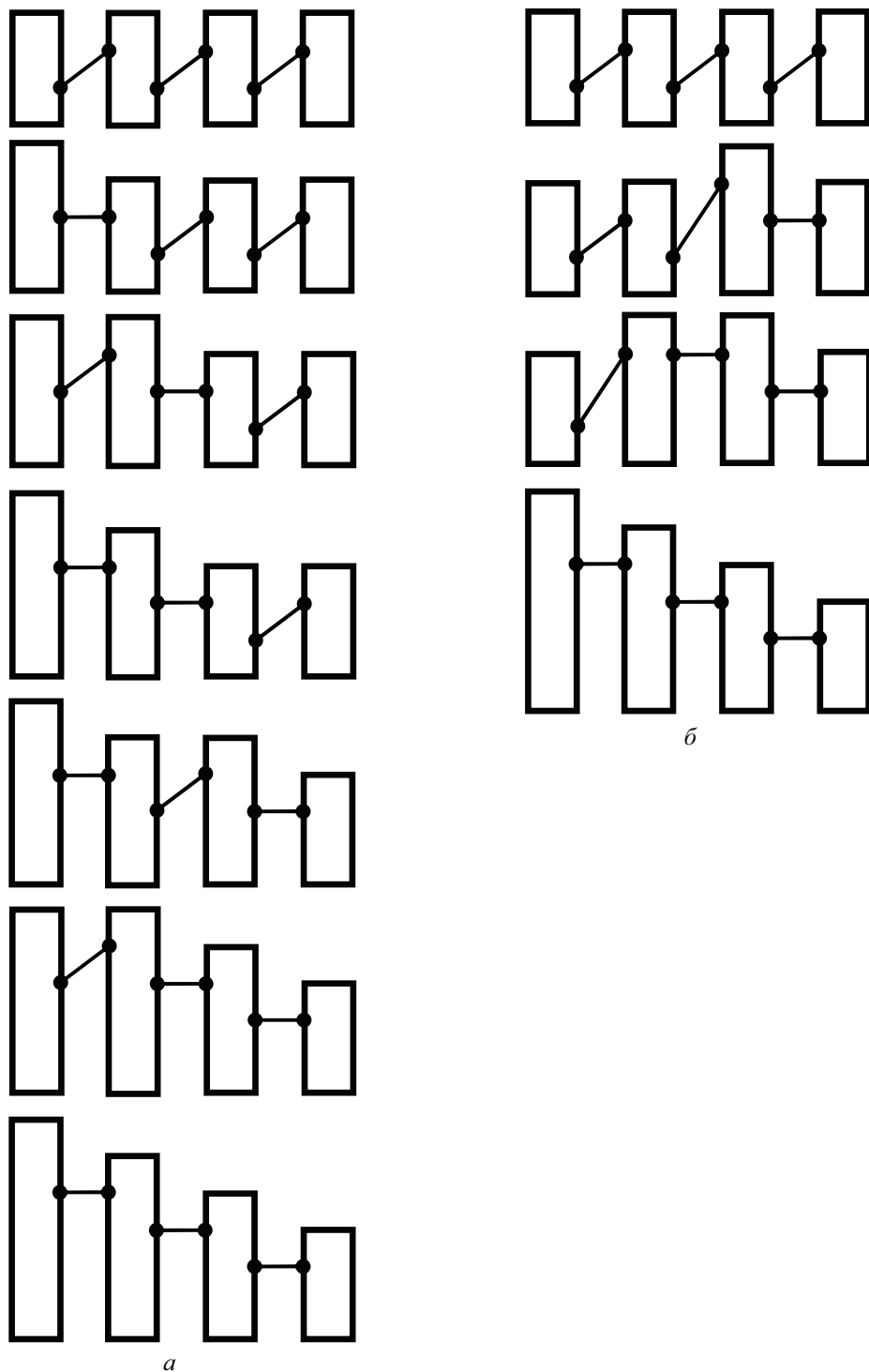


Рис. 2

Для иллюстрации эффективности алгоритма в таблице приведено количество этапов для неоптимальной и оптимальной последовательностей согласования «одного яруса» выводов ячеек, а на рис. 2, а и б соответственно для неоптимальной и оптимальной последовательностей схематично изображены этапы согласования положения выводов четырех ячеек.

Как видно из таблицы, число этапов согласования положения выводов и габаритов даже при сравнительно небольшом числе ячеек и количестве «ярусов» согласуемых выводов может быть достаточно велико. Так при согласовании положения выводов  $N$  ячеек на одном ярусе для неоптимальной последовательности число этапов будет равно

$$\sum_{i=2}^{N-1} (i-1),$$

а для оптимальной последовательности всего лишь  $N - 1$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологически инвариантная система проектирования топологии стандартных фрагментов МОП БИС / И. С. Зуев, А. Б. Максимов, С. Э. Миронов, Н. М. Сафьянников // Изв. вузов. «Электроника». 2003. № 3. С. 63–70.
2. Миронов С. Э., Васильев А. Ю. Итерационное сжатие с ограничениями при иерархическом технологически инвариантном проектировании топологии макрофрагментов БИС // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». 2010. Вып. 3. С. 10–15.
3. Иерархический технологически инвариантный компилятор схемы деления / А. Ю. Васильев, С. Э. Миронов, Л. Г. Морозова, А. К. Фролкин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 4. С. 31–35.

*S. E. Mironov, A. U. Vasilev*

### *OPTIMIZATION OF MACROBLOCK CELLS LAYOUT CONVERGENCE FOR DIMENSIONS AND SITUATION FINDINGS*

*This article is devoted to optimizing the process of computer-aided design of regular VLSI macroblock*

**VLSI macroblocks, matrices divider, process-tolerant hierarchical design, layout compaction, system of computer-aided design**

УДК 621.396.67

*О. И. Кутузов, В. Н. Задорожный*

## **К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ФРАКТАЛЬНЫХ СМО**

*Рассматриваются специфические проблемы имитационного моделирования фрактальных СМО и предлагается ускоренный метод расчета емкости их буферов.*

**Фрактальные СМО, буфер, распределение Парето, степенная аппроксимация**

Основной особенностью трафика современных телекоммуникационных сетей с коммутацией пакетов является его масштабная инвариантность (фрактальность), существенно влияющая на качество связи [1]–[3]. Исследования трафика концентрируются вокруг статистических характеристик очередей, поскольку буферизация сообщений рассматривается как основная обеспечивающая ресурсами стратегия.

Результаты нового взгляда на природу сетевого трафика «...означают, например, что целая область проектирования компьютерных устройств – построение буферов и управление ими – нуждается в радикальном пересмотре... . Однако среди специалистов пока нет единого мнения о том, какие математические инструменты применимы и эффективны для его исследования и прогнозирования. Их разработка должна стать следующим важным шагом в этой области»\*.

\* William Stallings. Интернет и телекоммуникации. URL: [http://my.online.ru/it/press/cwm/19\\_97/world.htm](http://my.online.ru/it/press/cwm/19_97/world.htm) (Дата обращения: 13.03.2010).

Фрактальные, т. е. степенные или асимптотически-степенные [3] распределения – это распределения с тяжелыми хвостами (РТХ). В книге [4] в числе перспективных моделей теории массового обслуживания упоминаются «модели с "тяжелыми хвостами" распределений, характеризующих входящий поток и процесс обслуживания».

В статье рассматриваются специфические проблемы имитационного моделирования (ИМ) фрактальных СМО и предлагается ускоренный метод расчета их буферов.

*Проблема корректной реализации фрактальных распределений.* При ИМ реализация фрактальных распределений сопряжена со специфическими трудностями вычислительного характера. Поясним их на примере распределения Парето, описываемого плотностью вероятностей (п. в.)

$$f(t) = \frac{\alpha K^\alpha}{t^{\alpha+1}}, \quad \alpha > 0, \quad t \geq K, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – параметр формы,  $K > 0$  – минимум случайной величины  $x$  (масштабный параметр).

Соответствующая функция распределения (ф. р.) имеет вид

$$F(t) = 1 - (K/t)^\alpha, \quad t \geq K. \quad (2)$$

С учетом (1)  $k$ -й начальный момент распределения Парето (РП) выражается в виде:

$$M(x^k) = \int_K^\infty t^k f(t) dt = \begin{cases} \frac{\alpha K^k}{\alpha - k}, & \alpha > k, \\ \infty, & \alpha \leq k \quad (k = 1, 2, \dots). \end{cases} \quad (3)$$

Отсюда при  $\alpha > 1$  находим конечное среднее (м. о.)  $M(x) = \alpha K / (\alpha - 1)$ , при  $\alpha > 2$  – конечную дисперсию  $D(x) = M(x^2) - M^2(x) = \alpha K^2 / [(\alpha - 1)^2 (\alpha - 2)]$ .

В позициях обозначений Кендалла будем указывать распределение Парето в виде Pa.

Сгенерируем на GPSS посредством функции `Pareto(1, 1, 1.1)` 100 млн независимых значений случайной величины (с. в.)  $x \in \text{Pa}(K, \alpha)$  при  $K = 1$ ,  $\alpha = 1.1$  и вычислим статистические оценки  $M^*$  и  $\sigma^*$  для м. о.  $M(x)$  и среднеквадратичного отклонения  $\sigma_x$ . Согласно (3)  $M(x) = 11$  и  $\sigma_x = \infty$ , однако получаемые оценки  $M^* \approx 7.5$  и  $\sigma^* \approx 380$  сильно отличаются от приведенных точных значений. Заметим, что стократно более короткая выборка из 1 млн значений экспоненциальной с. в. дает оценки для ее среднего и дисперсии с тремя точными значащими цифрами. Причиной больших ошибок (не вполне очевидной) здесь является дискретизация представления непрерывной с. в.  $x$ .

Действительно, для реализации с. в.  $x \in \text{Pa}(K, \alpha)$ , обращая ф. р. (2), получаем формулу  $x = K / \sqrt[\alpha]{1-z}$  или, проще,  $x = K / \sqrt[\alpha]{z}$ , где  $z \in R(0, 1)$  – базовая с. в., равномерно распределенная на отрезке  $(0, 1)$ . Степень дискретизации с. в.  $x \in \text{Pa}(K, \alpha)$  определяется шагом  $\varepsilon$  дискретизации с. в.  $z$  в датчике `Uniform(1, 0, 1)`. Этот шаг составляет 0.000001, и `Uniform(1, 0, 1)` выдает значения  $z_i \in \{0.000000, 0.000001, 0.000002, \dots, 0.999999\}$ , выбираемые случайно и равновероятно. В результате функция `Pareto(1, 1, 1.1)` вместо непрерывной с. в.  $x \in \text{Pa}(K, \alpha)$  при  $K = 1$ ,  $\alpha = 1.1$  реализует некоторую дискретную с. в.  $y$  с параметрами:

$$M(y) = \sum_{i=1}^{999\,999} p_i y_i = \frac{1}{999\,999} \sum_{i=1}^{999\,999} \frac{K}{\sqrt[i]{z_i}} \approx \frac{1}{10^6} \sum_{i=1}^{10^6} \frac{1}{1.1\sqrt[i]{10^{-6}i}} = \frac{1/\varepsilon}{\sum_{i=1}^{1/\varepsilon} 1.1\sqrt[i]{\varepsilon i}} = 8.0296,$$

$$D(y) \approx \varepsilon \sum_{i=1}^{1/\varepsilon} \left[ \frac{1}{1.1\sqrt[i]{\varepsilon i}} \right]^2 - M^2(y) = 150\,449.7, \quad \sigma_y = \sqrt{D(y)} = 387.9. \quad (4)$$

К этим  $M(y)$ ,  $\sigma_y$  и приближаются оценки  $M^* \approx 7.5$ ,  $\sigma^* \approx 380$  в описанном ранее эксперименте с выборкой 100 млн чисел из РП. В табл. 1 характеристики с. в.  $y$ , реализующей с. в.  $x \in Pa(K, \alpha)$  при  $K = 1$ ,  $\alpha = 1.1$ , рассчитаны по формулам (4) для различных  $\varepsilon$ .

Таблица 1

$\varepsilon$	$M(y)$	$D(y)$	$\sigma_y$	$\Delta M = 11 - M(y)$
$10^{-4}$	6.485	3433.8	58.6	4.515
$10^{-5}$	7.338	22 821.9	151.1	3.662
$10^{-6}$	8.030	150 449.7	387.9	2.970
$10^{-7}$	8.591	990 215.9	995.1	2.409
$10^{-8}$	9.046	6 515 370.2	2552.5	1.954

Из таблицы видно, что  $M(y)$  и  $\sigma_y$  с уменьшением  $\varepsilon$  приближаются к параметрам  $M(x) = 11$  и  $\sigma_x = \infty$ . В GPSS можно обеспечить шаг  $\varepsilon = 10^{-12}$ , реализуя с. в.  $z$  выражением  $(\text{Uniform}(1, 0, 1) + 1E-6 \# \text{Uniform}(1, 0, 1))$ , которое возвращает равновероятные  $z_i \in \{0.000000000000, 0.000000000001, \dots, 0.999999999999\}$ , и даже шаг  $\varepsilon = 10^{-15}$ . Но более мелкий шаг превращается в «машинный нуль». Найдем наибольшее  $\varepsilon$ , обеспечивающее «приемлемую» погрешность  $\Delta M = 11 - M(y) = 0.001$ . Для этого нужно продолжить расчеты в табл. 1 до значений  $\varepsilon = 10^{-12}$ ,  $10^{-15}$  и далее. Однако при таких значениях  $\varepsilon$  расчеты по формулам (4) становятся слишком трудоемкими. Расчет сумм для  $10^{12} \dots 10^{15}$  слагаемых требует от нескольких дней до нескольких лет машинного времени.

Выполним расчеты следующим образом. Часть зависимости  $\Delta M(\varepsilon)$ , представленная в табл. 1, отображается пятью точками графика, лежащими при логарифмическом масштабе шкал на идеальной прямой. Это свидетельствует о степенной (в рассматриваемом диапазоне) зависимости между  $\Delta M$  и  $\varepsilon$ . Степенная аппроксимация

$$\Delta M(\varepsilon) = 10.433\varepsilon^{0.0909} \quad (5)$$

при ее использовании для расчета пяти значений  $\Delta M$ , представленных в табл. 1, характеризуется погрешностями, примерно равными единице их младшего разряда. По формуле (5) находим  $\Delta M(10^{-12}) = 0.846$  и  $\Delta M(10^{-15}) = 0.452$ . Итак,  $\Delta M$  при  $\varepsilon = 10^{-12}$  и даже при  $\varepsilon = 10^{-15}$  в сотни раз (!) превышает «приемлемую» погрешность. Используя (5), требуемое  $\varepsilon$  найдем из уравнения  $\Delta M = 10.433\varepsilon^{0.0909} = 0.001$ . Решая это уравнение, определяем  $\varepsilon \approx 6.21 \cdot 10^{-45} \approx 2^{-147}$ . Отсюда видно, что дискретность вещественных чисел, представимых в обычной 32-разрядной машинной арифметике, не позволяет обеспечить «приемлемую» погрешность реализации с. в.  $x \in Pa(K, \alpha)$  при  $K = 1$ ,  $\alpha = 1.1$ .

Таким образом, одной из первоочередных задач при ИМ фрактальных СМО является задача корректной реализации фрактальных распределений.

*Моделирование систем M|Pa|1, Pa|M|1 и фрактальных потоков.* В позициях обозначений Кендалла будем РП указывать в виде Pa. При сопоставлении результатов ИМ систем M|Pa|1, Pa|M|1 и особенно систем Pa|Pa|1 с точным анализом их характеристик (там, где такой анализ возможен) обнаруживаются специфические проблемы, отсутствующие в «классическом» опыте ИМ СМО.

1. В системе M|Pa|1 при  $K = 1$ ,  $\alpha = 1.1$  и  $\rho = 0.5$  ( $\lambda = \rho/M(x) = 1/22$ ) средняя длина очереди  $L = \infty$  (причем  $L = \infty$  при любом  $\rho > 0$ , поскольку  $M(x^2) = \infty$ ). При ИМ этой СМО на GPSS с обычным шагом дискретизации  $\varepsilon = 10^{-6}$  оценка для  $\rho$  сходится приблизительно к 0.36 (не к истинному значению  $\rho = 0.5$ ), а оценка для  $L$  – приблизительно к 250. Но при параметрах *реализованного* времени обслуживания  $y$  (табл. 1, см. строку  $\varepsilon = 10^{-6}$ ), действительно,  $\rho = \lambda M(y) \approx 0.36$  и (по формуле Хинчина)  $L = 244.9 \approx 250$ .

Если при  $K = 1$  задать  $\alpha = 2.1$  ( $\rho = 0.5$ ,  $\lambda = 11/42$ ,  $L = 1.44$ ), то ИМ дает для  $\rho$  оценку 0.5 (верную), но для  $L$  – заниженную оценку 0.72. Занижение оценки для  $L$  – следствие занижения дисперсии с. в. х.

2. В системе Pa|M|1 при бесконечной дисперсии длительности  $\tau$  интервалов поступления средняя длина очереди  $L$  конечна (если  $\rho < 1$ ). Сравнение результатов ИМ системы Pa|M|1 ( $\rho_{ИМ}$ ,  $L_{ИМ}$ ) и точных (численных) решений ( $\rho$ ,  $L$ ) приводится в табл. 2 (рассчитанной в [5]). Здесь  $\tau \in Pa(1, \alpha)$ . Уравнение для расчета  $L$ , включающее преобразование Лапласа–Стилтьеса от ф. р. (2), решается в [5] численным методом. При  $\alpha = 1.1$  оценка  $\rho_{ИМ}$  завышается пропорционально занижению  $M(\tau)$ , т. е. (см. табл. 1) в  $11/8.03 = 1.36$  раза. Завышенная загрузка  $\rho_{ИМ}$  при достаточно больших  $\rho$  влияет на оценку  $L_{ИМ}$  сильнее, чем занижение (бесконечное) дисперсии с. в.  $\tau$ , и оценка  $L_{ИМ}$  для  $L$  завышается. Критической загрузкой  $\rho$ , при которой  $\rho_{ИМ} \rightarrow 1$  и  $L_{ИМ} \rightarrow \infty$ , является  $\rho = 8.03/11 = 0.73$ .

Таблица 2

$\rho$	$\alpha = 2.1, M(\tau) = 1.90909$			$\alpha = 1.1, M(\tau) = 11$		
	$\rho_{ИМ}$	$L$	$L_{ИМ}$	$\rho_{ИМ}$	$L$	$L_{ИМ}$
0.1	0.100	0.0001	0.0001	0.136	0.035	0.047
0.2	0.200	0.0067	0.007	0.275	0.369	0.505
0.3	0.300	0.0364	0.036	0.402	2.037	2.733
0.4	0.400	0.1106	0.111	0.532	10.75	14.409
0.5	0.500	0.2635	0.264	0.673	49.81	98.139
0.6	0.600	0.5640	0.564	0.831	251.2	859.316

3. При суммировании  $N$  потоков с РП интервалов  $\tau$  при  $\alpha \leq 1$ , т. е. с бесконечным (в ИМ – очень большим) м. о.  $M(\tau)$ , или при  $1 \leq \alpha \leq 2$ , т. е. только с бесконечной дисперсией  $D(\tau)$ , многие статистические характеристики суммарного потока (например, коэффициент вариации) с ростом  $N$  сближаются с характеристиками пуассоновского потока. При этом график эмпирической ф. р. интервалов суммарного потока визуально хорошо совмещается с графиком экспоненциального распределения. Однако в имитационной модели



при направлении суммарного потока на вход СМО с экспоненциальным временем обслуживания средняя длина очереди оказывается на порядки более высокой, чем в системе  $M|M|1$ , которая бы сформировалась, если бы суммарный входной поток был действительно пуассоновским. Таким образом, сумма фрактальных потоков в общем случае к пуассоновскому потоку не сходится. Случайное их прореживание – тоже: точные соотношения [6] показывают, что если первый (второй) момент прореживаемого потока бесконечен, то и первый (второй) момент прореженного – тоже бесконечен.

*Система Pa|Pa|1.* Типовая модель узла сети с фрактальным трафиком – это СМО с фрактальными распределениями, характеризующими как входящий поток, так и процесс обслуживания, имеющая  $n \geq 1$  каналов, например СМО типа  $Pa|Pa|n|k$ . Специфику моделирования таких СМО можно показать на примере системы  $Pa|Pa|1$  с интервалами поступления  $\tau \in Pa(1, 1.1)$  и временем обслуживания  $x \in Pa(1, 1.5)$ .

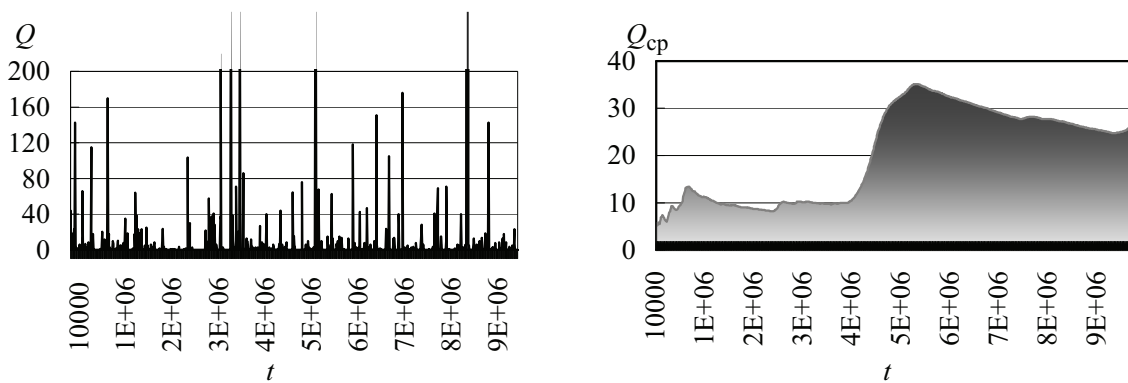


Рис. 1

На рис. 1 слева показано изменение длины  $Q$  очереди в этой СМО. Значения  $Q$ , взятые в точках  $t = 10$  тыс.,  $20$  тыс., ..., получены путем ИМ при шаге дискретизации  $\varepsilon = 10^{-12}$ . Справа на рисунке для тех же  $t$  представлен процесс  $Q_{cp}(t)$ , полученный усреднением 50 независимых траекторий оценки для  $L$ . Очевидным является резкое отличие этих характеристик системы  $Pa|Pa|1$  от характеристик классических СМО типа  $M|M|1$ . Заметим, что в моделируемой СМО  $Pa|Pa|1$   $\rho = 0.3$ .

*Ускоренный метод расчета буферов фрактальных СМО.* Расчет буфера фрактальной СМО, гарантирующего малую вероятность  $P$  потери заявки (например,  $P \leq 10^{-8}$ ), требует при непосредственном ИМ неприемлемо высоких затрат времени, обусловленных необходимостью оценивать малую вероятность  $P$  при большой дисперсии длины очереди и длительных переходных процессах в системе.

Предлагаемый аналитико-имитационный подход является модификацией метода экстремальных статистик [7]. При малых  $P$  число отказов  $N_0$ , которые произойдут за время данного периода непрерывной занятости (ПНЗ) системы с бесконечным буфером, если его заменить буфером объема  $m$ , можно определять по формуле

$$N_0 = \max \{ Q_{\max} - m, 0 \},$$

где  $Q_{\max}$  – максимальная длина очереди, достигаемая на этом ПНЗ при бесконечном буфере [7]. Формула позволяет по одному прогону модели с достаточно большим числом ПНЗ рассчитать общее число отказов сразу для многих значений  $m$  и получить соответст-

вующие оценки  $P = P(m)$  (рис. 2), сокращая тем самым время ИМ на 2–3 порядка. За пару секунд моделирования системы Pa|Pa|1 (см. ранее) формируется набор данных, позволяющий аппроксимировать зависимость  $P(m)$ . Так, на рис. 2 построены экспоненциальная (слева) и степенная аппроксимации (шкалы  $P$  логарифмические; шкала  $m$  справа также логарифмическая; маркеры – данные ИМ).

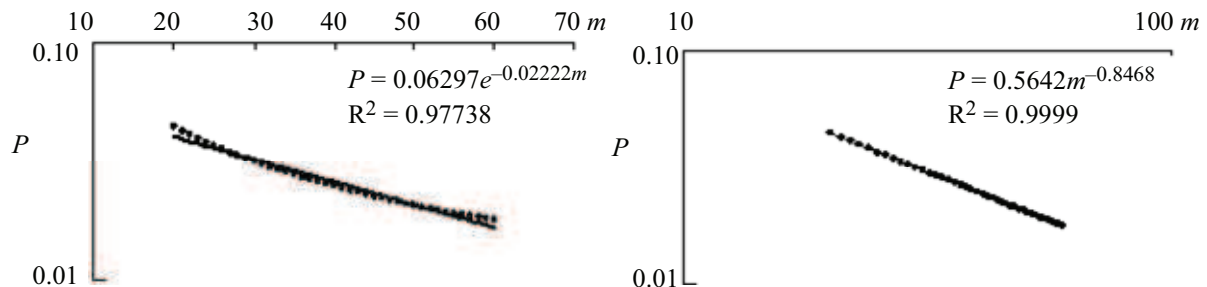


Рис. 2

В целом выясняется, что для фрактальных СМО степенные аппроксимации зависимости  $P(m)$  весьма точны. Для упомянутой СМО Pa|Pa|1 экспоненциальный прогноз вероятности  $P$  на точку  $m = 700$  дает оценку  $P^* = 1.1 \cdot 10^{-8}$ , степенной –  $P^* = 0.0022$ , ИМ (при прогоне 1 млн заявок) при  $m = 700$  дает  $P^* = 0.0024$ . Возможно, для фрактальных СМО асимптотика  $P(m)$  при  $m \rightarrow \infty$  действительно степенная (заметим, что в системе M|M|n|m зависимость  $P(m)$  асимптотически экспоненциальная). Из степенного уравнения  $P = 0.5642m^{-0.8468}$  (рис. 2, справа) находим  $m(P) = \exp(\ln(0.5642/P)/0.8468)$ . Отсюда требуемый для  $P = 10^{-8}$  объем буфера  $m = \exp(\ln(0.5642 \cdot 10^8)/0.8468) = 1.4 \cdot 10^9$ .

Предложенный подход к расчету буферов для узлов сетей с фрактальным трафиком позволяет определять размеры буферов с достаточной точностью, сокращая время ИМ на несколько порядков. Изложенные результаты позволяют применять этот подход к многоканальным СМО и исследовать эффекты суммирования/прореживания фрактальных потоков (в контексте задач буферизации), учитывая проблемы реализации фрактальных распределений. Эксперименты показывают, что зависимость вероятности  $P$  потери заявки от размера  $m$  буфера фрактальной СМО при  $m \rightarrow \infty$  близка к степенной. Актуальна задача формального асимптотического анализа этой зависимости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелухин О. И., Теняшев А. М., Осин А. В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях / Под ред. О. И. Шелухина. М.: Радиотехника, 2003.
2. Столлингс В. Современные компьютерные сети. СПб.: Питер, 2003.
3. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Институт компьютерных исследований. М., 2002.
4. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003.
5. Задорожный В. Н. Аналитико-имитационные исследования больших сетевых структур. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011.
6. Рыжиков Ю. И. Компьютерное моделирование систем с очередями: курс лекций / ВКА им. А. Ф. Можайского. СПб., 2007.
7. Кутузов О. И., Хаддад М. Аналитико-статистический метод расчета малых вероятностей потерь в буфере конечной емкости // Телекоммуникационные технологии. 1994. Вып. 1. С. 36–49.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И ПОДГОТОВКИ ОПИСАНИЯ СХЕМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА SPICE**

*На примере элемента 2И рассматриваются вопросы автоматизации извлечения паразитных параметров из топологии ИС.*

**Топология БИС, моделирование на SPICE, извлечение паразитных параметров, автоматизация**

*Критерии оценки микроэлектронных проектов.* Основными характеристиками микроэлектронных проектов являются площадь кристалла и быстродействие. Минимизация площади кристалла обеспечивается минимизацией площади топологии ячеек, оптимизацией топологического плана и применением эффективных методов размещения и трассировки ячеек и макроблоков СБИС. Для достижения высокого быстродействия используются различные схемотехнические приемы и топологические решения, а также методы и средства структурно-топологической оптимизации, осуществляющие компоновку и трассировку макроблоков СБИС и самих СБИС по критерию минимизации протяженности межсоединений, а следовательно, и времен задержек схем.

Оценка результатов проектирования с точки зрения аппаратных затрат не вызывает затруднений: площадь на кристалле разработанной топологии ячеек, макроблоков или целой БИС определить не так уж трудно. Гораздо сложнее задача оценки быстродействия микроэлектронных изделий, тем более что она в процессе разработки должна выполняться многократно, а для нерегулярных макроблоков – итерационно.

Таким образом, автоматизация процесса оценки быстродействия является одной из наиболее важных задач в микроэлектронике.

*Оценка быстродействия.* Задача определения времен задержек микроэлектронных изделий осуществляется моделированием происходящих в них электрических процессов с использованием различных моделей элементов (от транзисторов до макроблоков БИС) с различными наборами параметров.

Модели элементов в первом приближении можно разделить на простые линейные и сложные нелинейные, обеспечивающие более точные результаты моделирования.

Несмотря на постоянный рост производительности средств вычислительной техники, сейчас оба типа моделей сосуществуют. «Вторая молодость» линейной аппроксимации сигналов в моделях транзисторов, как это ни странно, связана именно с развитием вычислительной техники. С одной стороны, производительность техники и эффективность про-

граммного обеспечения возрастают, а с другой – возрастает и сложность проектов. Поэтому для моделирования таких больших и сложных объектов, как макроблоки и целые интегральные схемы, используются программные средства линейной аппроксимации, позволяющие, тем не менее, получить приемлемый по точности результат. В частности, такие программы были реализованы в Ереванском филиале фирмы Synopsys.

Модели различаются не только способом аппроксимации и точностью результатов, но и используемыми параметрами [1].

В многочисленных разновидностях наиболее распространенных программ моделирования с нелинейной аппроксимацией SPICE в перечень основных параметров транзисторов входят длина  $L$  и ширина  $W$  канала, определяющие сопротивление и емкость затвора, а также площади  $AD$  и  $AS$  и периметры  $PD$  и  $PS$  стоков и истоков транзисторов, по которым вычисляются значения их собственных паразитных емкостей.

Помимо этого в описание электрической схемы включаются емкости и сопротивления межсоединений и сопротивления стоков и истоков транзисторов.

Использование этих параметров в различных сочетаниях позволяет оценить быстродействие схем с разной степенью точности. Однако определение значений этих параметров – весьма трудоемкий процесс, поэтому программные средства его автоматизации являются обязательной составляющей для микроэлектронных САПР. Такие программы входят в состав систем Cadence, Synopsys, Mentor Graphics, являющихся безусловными лидерами в области разработки систем автоматизированного проектирования.

Несмотря на необычайно сложную ситуацию в российской микроэлектронике, среди отечественных систем проектирования есть очень интересные разработки. К их числу можно, например, отнести САПР аналого-цифровых систем на кристалле AVOCAD [2], в состав которой входят редактор топологии и оригинальная система схемотехнического моделирования, совмещающая точность и высокую производительность. Однако, к сожалению, средства извлечения паразитных параметров из топологии в ней отсутствуют.

Данная статья посвящена описанию программных средств, позволяющих определить значения паразитных параметров транзисторов по топологии схемы.

*Основные этапы процесса оценки паразитных параметров транзисторов.* Для определения значений паразитных параметров транзисторов помимо собственно определения значений периметров и площадей их стоков и истоков необходимо выполнить ряд действий, предусматривающих и преобразование исходной топологии.

Как видно из рис. 1, на котором изображены топологический эскиз (рис. 1, *а*) и топологический чертеж (рис. 1, *б*) элемента «2И» (электрическая схема элемента приведена на рис. 2), топология может собираться из различных компонентов, накладывающихся друг на друга. Поэтому, как показано на рис. 3, во избежание дублирования при оценке геометрических характеристик топологии (рис. 3, *а*), состоящей из нескольких частей (рис. 3, *б*), необходимо, прежде всего, объединить области чертежа, относящиеся к одному топологическому слою (рис. 3, *в*).



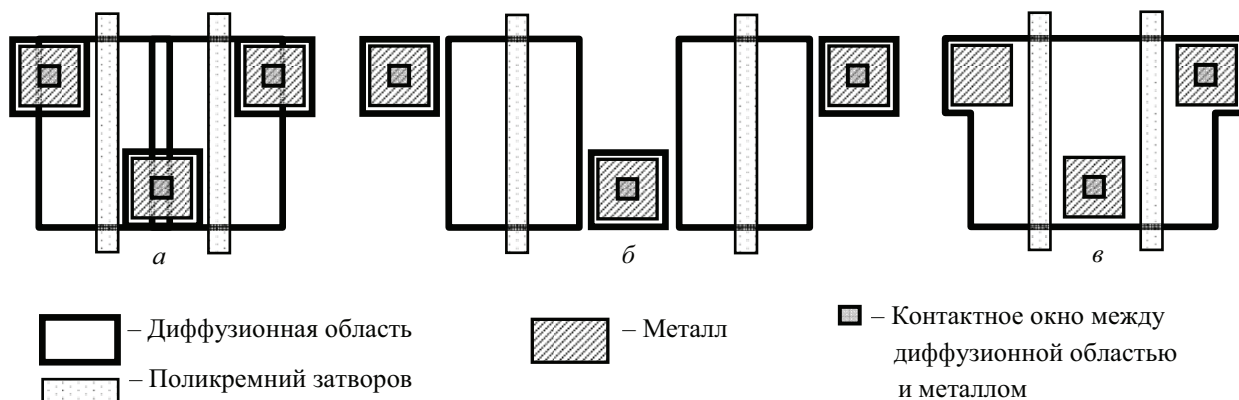


Рис. 3

В связи с особенностями технологических операций границы областей на кристалле могут быть смещены как «наружу» так и «внутри» по отношению к границам соответствующих областей на чертеже. Поэтому для оценки характеристик реальной топологии следует учесть данный технологический уход границ, преобразовав должным образом топологический чертеж (рис. 4), а затем «вычисть» поликремний из диффузии (рис. 5).

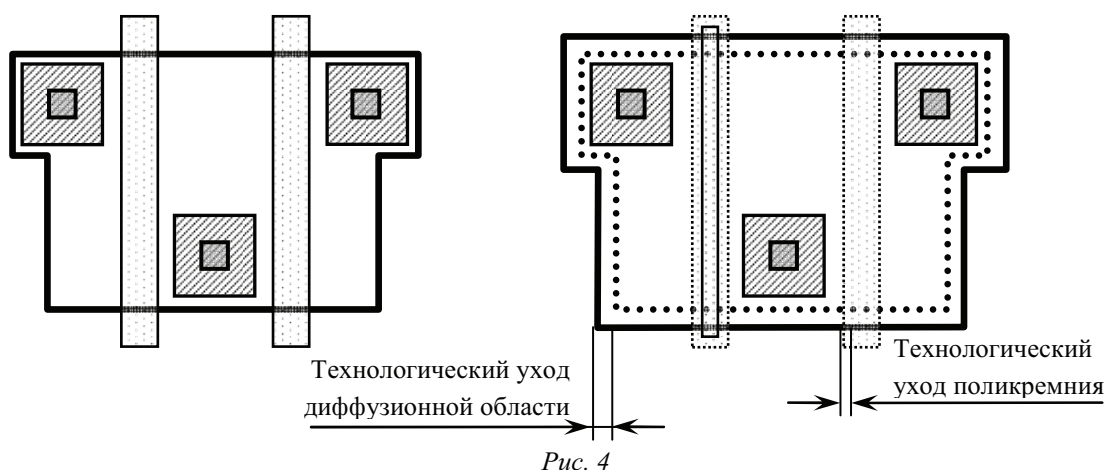


Рис. 4

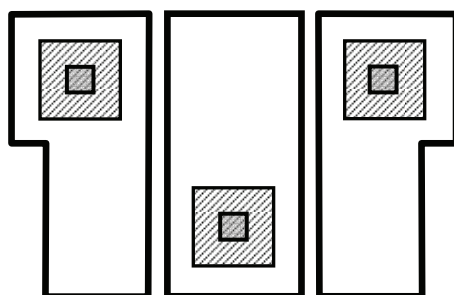


Рис. 5

Для полученных фигур вычисляются периметры и площади, и их значения в соответствии с текстовыми маркерами, отмечающими на чертеже диффузионные области, сообщаются тем или иным узлам электрической схемы. При этом полученные значения периметров и площадей делятся между стоками и истокам транзисторов, затворы которых граничат с диффузионными областями.

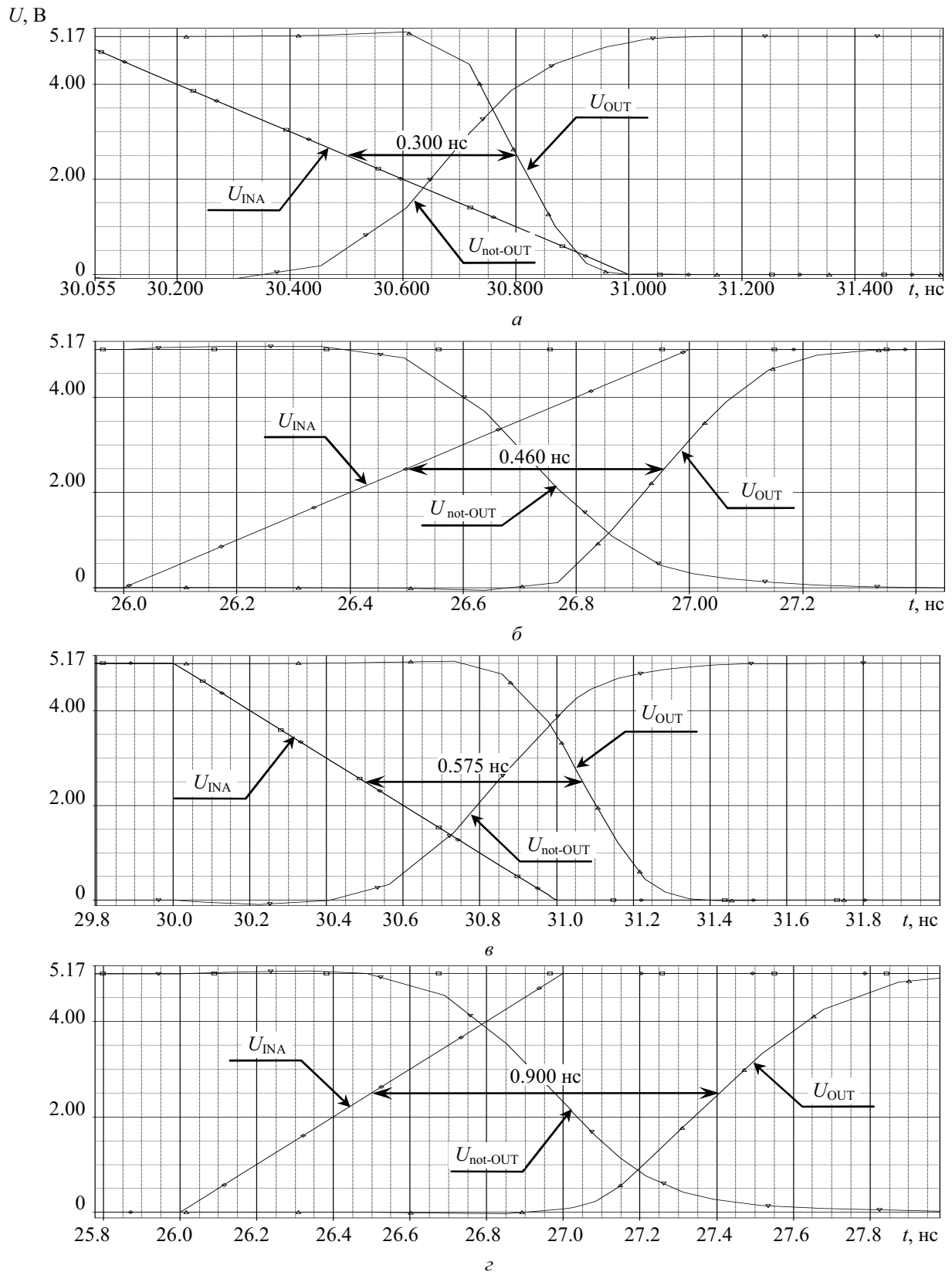


Рис. 6

На рис. 6 приведены результаты моделирования на SPICE работы элемента «2И» без учета (рис. 6, а, б) и с учетом (рис. 6, в, г) значений паразитных параметров транзисторов.

Далее приведены фрагменты описания схемы до и после подстановки значений паразитных параметров.

M\_TNA NOT-OUT INA POINTNAB 0 MbreakN L=1.2u W=8u

M\_TNA NOT-OUT INA POINTNAB 0 MbreakN L=1.2u W=8u  
+ AD=40p AS=40p PD=0.000026 PS=0.000026

Рассмотренная технология определения значений паразитных параметров транзисторов, наглядно демонстрирующая сложность и трудоемкость процесса извлечения параметров из топологии интегральных схем, и полученные для элемента «2И» временные характеристики, изменяющиеся почти в 2 раза при учете значений периметров и площадей стоков и истоков, свидетельствуют о необходимости дальнейшего развития и совершенствования программных средств оценки паразитных параметров топологии интегральных схем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабаи Ж. М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. СПб.: Вильямс, 2007.
2. Система схемотехнического моделирования AVOCAD. Проектирование аналого-цифровых систем на кристалле / Г. Казеннов, С. Кокин, С. Макаров и др. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2004. № 5. С. 72–75.

*S. E. Mironov, L. E. Andreev, A. A. Baranov*

*AUTOMATION OF PARASITIC PARAMETERS EXTRACTION FROM INTEGRATED CIRCUITS LAYOUT AND TRAINING DESCRIPTION SCHEMES FOR SIMULATION ON SPICE*

*The questions of automation of parasitic parameters extraction from integrated circuits layout are considered in examples the 2AND-gate*

**VLSI layout, simulation on SPICE, parasitic parameters extraction, automation**

УДК 004.056.53

*С. В. Штанько, Н. А. Жукова*

## **СХЕМЫ АУТЕНТИФИКАЦИИ ДАННЫХ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГИС**

*Изложены подходы к реализации функций аутентификации пользователей и данных в распределенных геоинформационных системах (ГИС), позволяющие избежать недостатков существующих протоколов в рамках требований, предъявляемых к безопасности геоинформационной системы. Предложен способ хранения личных ключей пользователей на сервере для случая, когда хранение личных ключей пользователем у себя не может быть реализовано. Предложен способ привязки процесса идентификации пользователя к его географическому положению.*

**Распределенная ГИС, электронная цифровая подпись, аутентификация**

При развертывании распределенных геоинформационных систем часто возникает необходимость использования различных функций защиты геоинформационных данных, в том числе и криптографической защиты. В зависимости от типа и назначения геоинформационной системы может возникнуть необходимость в функциях аутентификации данных и пользователей и шифрования данных. Возникающие при этом проблемы связаны с тем, что системе безопасности необходимо обслуживать большое количество пользователей при обмене с ними большими объемами разнородной информации. При этом возникают ситуации, когда пользователи не могут хранить ключевую информацию у себя. В этом



случае единственным возможным местом хранения ключевой информации остается сервер, причем необходимо обеспечить такой уровень безопасности хранения ключей, чтобы доступ к своему личному ключу мог получить только его владелец.

*Существующие подходы к проблеме аутентификации пользователей в распределенных информационных системах.* Рассмотрим распределенную геоинформационную систему с большим количеством рабочих мест и одним сервером. При этом пользователи не привязаны к рабочим местам и могут входить в систему с различных рабочих станций (терминалов).

Серверов может быть и больше, например, один для онтологии (их также может быть несколько), один для картографической информации и т. д. Под онтологией будем понимать детальную формализацию некоторой области с помощью концептуальной схемы, состоящей из иерархической структуры данных, содержащей все релевантные классы объектов, их связи и правила (теоремы, ограничения), принятые в этой области. В данной статье будем рассматривать один сервер онтологии объектов, используемых в геоинформационной системе, например морского назначения, как отображаемых, так и неотображаемых (корабли, порты, переходы, задачи и т. д.). Такая геоинформационная система может предоставлять различные данные для различных пользователей. В этом случае необходима реализация функции аутентификации пользователей и разделения доступа. Для этого будем использовать процедуры идентификации и аутентификации пользователей при входе в систему [1], [2]. Для идентификации пользователя  $A$  используем некоторую уникальную информацию, соответствующую ему – идентификатор  $Id_A$ . В простейшем случае это его условное наименование, так называемый логин. Аутентификация пользователя может быть выполнена на основе некоторых присущих ему уникальных данных. В простейшем случае это пароль  $PASS_A$  – некоторое секретное слово, набор символов, известный только пользователю и хранящийся в базе данных (БД) пользователей системы. Для проведения процедуры аутентификации пользователь вводит идентификатор и предъявляет пароль. Система проверки по идентификатору находит пароль пользователя и сверяет его с введенным. В случае совпадения пользователь  $A$  получает доступ к системе, в противном случае доступ запрещается. Для защиты аутентификационной информации выполняется хеширование пароля, при этом в хеш-функцию может вводиться переменная информация, например случайное число или метка времени. Детальный анализ современных подходов к аутентификации пользователей приведен в [1]–[4]. Результаты анализа показали, что ни один из существующих подходов не удовлетворяет в полной мере одновременно всему комплексу требований, предъявляемых к процедурам аутентификации в распределенных ГИС.

Информация, передаваемая в ходе процедуры аутентификации, должна на каждом сеансе быть различной, что не позволит злоумышленнику использовать перехваченные данные для аутентификации.

Пароли не должны храниться в БД в открытом виде, однако и их хранение в хешированном виде не должно позволять злоумышленнику использовать их в случае, если он смог получить доступ к БД.

В системе должна быть предусмотрена возможность хранения личных ключей пользователя на сервере, а также возможность привязки пользователя к географическим координатам.

Для удовлетворения приведенным требованиям и устранения недостатков существующих протоколов была разработана усиленная схема аутентификации.

*Усиленная схема аутентификации пользователя распределенной ГИС с возможностью хранения личных ключей для аутентификации данных на сервере.* Для реализации функций аутентификации и шифрования данных в геоинформационной системе целесообразно применять асимметричные криптосистемы. Однако непосредственно для шифрования данных целесообразно использовать симметричные криптосистемы как значительно более быстрые, причем асимметричные используются для генерирования ключей симметричной криптосистемы и аутентификации данных (реализации электронной цифровой подписи (ЭЦП)). Для построения такой системы необходимо, чтобы каждый пользователь системы обладал парой ключей – личным и открытым. Одним из подходов является использование различного рода электронных носителей (подобно тому, как это реализовано в банковских картах), на которых будет храниться личный ключ пользователя в зашифрованном виде. При осуществлении процесса аутентификации пользователь вводит пароль, который служит ключом к расшифровке личного ключа для дальнейшего его использования в процессах аутентификации и шифрования. Иногда применение схемы с электронными носителями не может быть реализовано. В этом случае личный ключ не может храниться у пользователя и единственным выходом является хранение пар ключей пользователей в БД и на сервере. Предлагается следующая схема аутентификации пользователей и применения асимметричных криптосистем для случая, когда ключевая информация может храниться только на сервере. В этом случае в записи пользователя А хранится его идентификатор (логин)  $Id_A$ , хешированный пароль в виде  $hash(PASS_A + Id_A)$ , открытый ключ  $k_{public}^A$  и зашифрованный личный ключ  $k_{private}^A$ . Личный ключ шифруется симметричным алгоритмом, ключ которого вырабатывается на основе пароля и передается пользователю по требованию в зашифрованном виде. Пользователь, используя свой пароль, может расшифровать личный ключ для осуществления различных криптографических операций, например выработки ЭЦП.

*Пример реализации схемы аутентификации и хранения ключей пользователей в распределенной ГИС.*

Создание записи пользователя:

1. Пользователь А генерирует идентификатор (логин)  $Id_A$  и пароль  $PASS_A$ .
2. Пользователь А генерирует секретный ключ  $k_{secret}^A$  симметричной системы для шифрования личного ключа  $k_{private}^A$ .
3. Пользователь А вычисляет  $h_A = hash(PASS_A + Id_A)$ .
4. Пользователь А вычисляет вспомогательный ключ  $k_{temp}^A = f(h_A)$ . В простейшем случае в качестве такого ключа можно использовать хеш-функцию  $h_A$  либо ее часть.
5. Пользователь А вычисляет с помощью симметричного алгоритма криптограмму  $CRYPTPASS_A = encrypt((h_A || k_{secret}^A); k_{temp}^A)$ .
6. Пользователь А генерирует пару ключей асимметричного алгоритма: открытый ключ  $k_{public}^A$  и личный ключ  $k_{private}^A$ .
7. Пользователь А шифрует личный ключ симметричным алгоритмом при помощи секретного ключа  $k_{secret}^A$ :  $ek_{private}^A = encrypt(k_{private}^A; k_{secret}^A)$ .

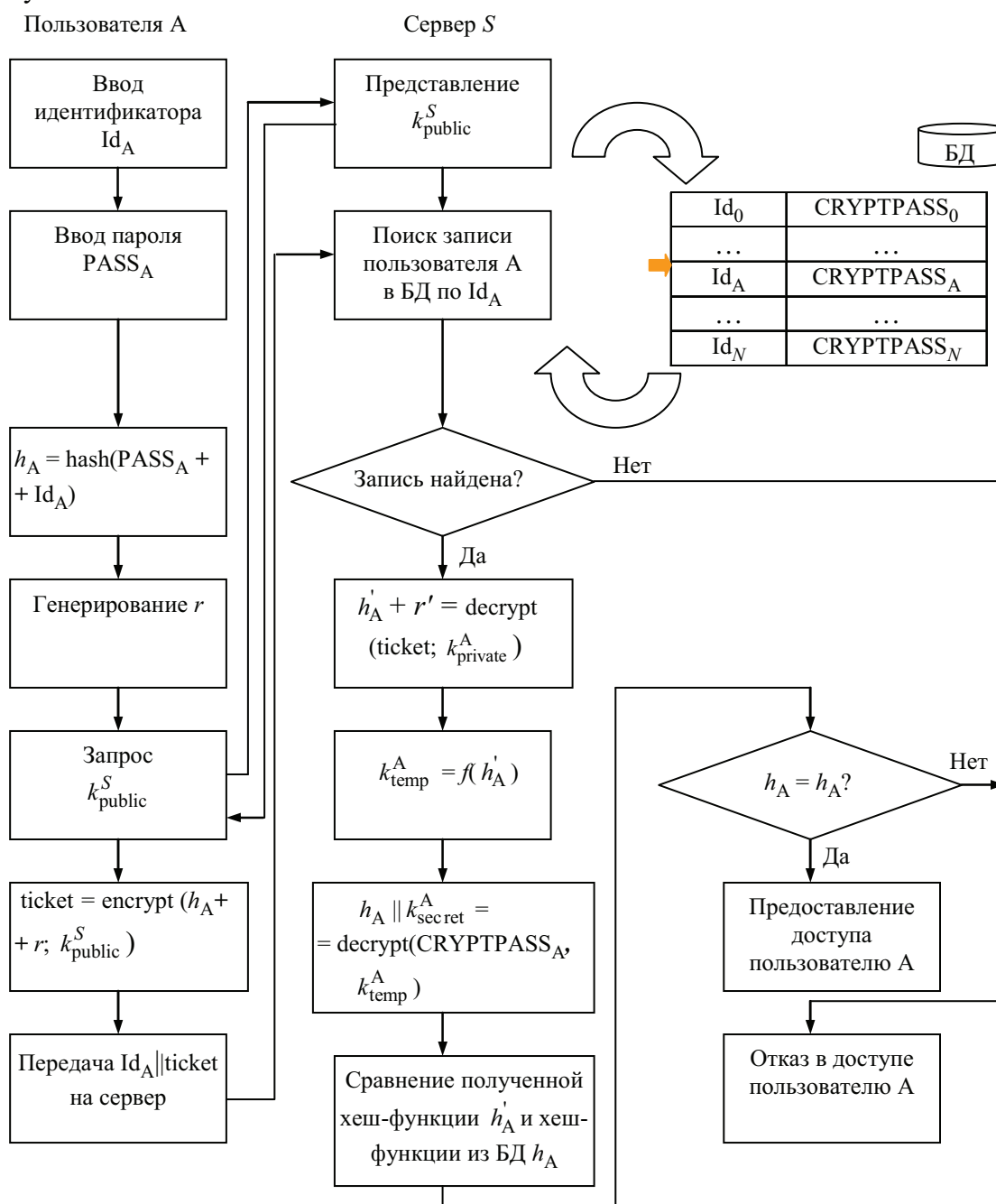
8. Пользователь А передает на сервер  $Id_A$ ,  $CRYPTPASS_A$ ,  $k_{public}^A$ ,  $ek_{private}^A$ .

9. Сервер сохраняет полученную информацию о новом пользователе в БД в следующем виде (табл. 1).

Таблица 1

Index	Login	Password	Privatekey	Publickey
...	...	...	...	...
$i_A$	$Id_A$	$CRYPTPASS_A$	$ek_{private}^A$	$k_{public}^A$
...	...	...	...	...

Схема аутентификации пользователя в этом случае приобретет вид, представленный на рисунке.



В приведенной схеме аутентификации пользователя в БД пользователей пароль  $CRYPTPASS_A$ . Далее серверу, чтобы получить  $h_A$ , необходимо выполнить операцию, обратную выполняемой при создании пользователя  $h_A || k_{secret}^A = \text{decrypt}(CRYPTPASS_A, k_{temp}^A)$ . Ключ  $k_{temp}^A$  при этом вычисляется из переданной клиентом  $h_A$  аналогично тому, как это выполнялось при создании пользователя:  $k_{temp}^A = f(h_A')$ .

Такая же процедура аутентификации выполняется и при запросе пользователем своего личного ключа для различных целей (например, для реализации ЭЦП). После успешной аутентификации значения  $CRYPTPASS_A$  и  $ek_{private}^A$  передаются пользователю. Чтобы получить свой личный ключ и осуществить подпись, пользователь выполняет следующие операции:

1. Пользователь А вычисляет  $h_A' = \text{hash}(PASS_A + Id_A)$ .
2. Пользователь А вычисляет вспомогательный ключ  $k_{temp}^A = f(h_A')$ .
3. Пользователь А вычисляет  $h_A || k_{secret}^A = \text{decrypt}(CRYPTPASS_A, k_{temp}^A)$ .
4. Пользователь А вычисляет  $k_{private}^A = \text{decrypt}(ek_{private}^A; k_{secret}^A)$ .
5. Пользователь А подписывает сообщение  $m$ :  $s_A = \text{sign}(m; k_{private}^A)$ .

Теперь подпись пользователя А могут проверить как сервер, так и любой другой пользователь, используя открытый ключ пользователя А  $k_{public}^A$ :

1. Сервер (пользователь В) получает подписанное сообщение  $m || s$ .
2. Сервер (пользователь В) вычисляет  $m' = \text{signver}(s; k_{public}^A)$ .
3. Сервер (пользователь В) проверяет подпись  $m' \stackrel{?}{=} m$  (на практике  $h'(m) \stackrel{?}{=} h(m)$ ).

Таким образом, описанная схема позволяет строить достаточно защищенные и в то же время не требовательные к ресурсам системы аутентификации пользователей.

*Привязка пользователя распределенной ГИС к географическим координатам.* В некоторых случаях в распределенных ГИС может потребоваться функция привязки пользователя к определенному месту. Другими словами, пользователь имеет право подключаться к системе, только находясь в определенной географической зоне. В этом случае географические координаты, полученные от датчика навигационной системы, становятся дополнительными аргументами хеш-функции. В этом случае учетные записи пользователей в БД будут оформлены в виде табл. 2.

Таблица 2

Index	Login	Password	Privatekey	Publickey	Lat	Lon
...	...	...	...	...	...	...
$i_A$	$Id_A$	$CRYPTPASS_A$	$ek_{private}^A$	$k_{public}^A$	$lat_A$	$lon_A$
...	...	...	...	...	...	...

При создании записи пользователя к аргументам хеш-функции добавляются координаты пользователя  $lat_A$ ,  $lon_A$ , полученные от датчика навигационной системы и округленные до определенного значения, так чтобы дискретность округленных координат превышала погрешность определения местоположения:  $h_A = \text{hash}(\text{PASS}_A + \text{Id}_A + lat_A + lon_A)$ . В дальнейшем в каждом процессе аутентификации при вводе идентификатора и пароля пользователем в терминал к ним автоматически прибавляются координаты данного терминала. Таким образом, если пользователь попытается войти в систему из другого места, полученное от пользователя значение  $h_A$  и значение  $h'_A$  из БД не совпадут и пользователь получит отказ в доступе.

Таким образом, предложенные подходы и схемы позволяют эффективно защищать информацию, циркулирующую в распределенных геоинформационных системах с учетом налагаемых ограничений. В частности, предложена схема использования асимметричных криптосистем для случая, когда пользователи не могут хранить ключевую информацию, и она должна храниться на сервере. Предложен подход, позволяющий «привязывать» пользователя к определенному географическому месту.

В статье приведены схемы без привязки к конкретным криптографическим алгоритмам. В описанных схемах в качестве симметричных и асимметричных алгоритмов могут быть выбраны любые алгоритмы, в зависимости от предъявляемых требований. Описанная схема была реализована в ГИС, разработанной с помощью платформы J2EE на основе встроенных средств JCA и JASS с использованием алгоритмов симметричного AES и асимметричного RSA.

Особо следует отметить, что рассмотренный стандарт X.509 не привязан к конкретным алгоритмам, но при этом в качестве асимметричных алгоритмов рекомендует использовать алгоритмы Диффи–Хеллмана и RSA. Авторам представляется более предпочтительным использование алгоритмов на эллиптических кривых как обладающих большей стойкостью и скоростью выполнения операций шифрования [4], [5]. Так, алгоритмы на эллиптических кривых при длине ключа (разрядности двоичного представления модуля  $p$ ) порядка 220–260 бит обеспечивают большую стойкость, скорость выполнения криптографических преобразований, чем алгоритмы RSA при длине ключа 2048 бит.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зима В. М., Молдовян А. А., Молдовян Н. А. Безопасность глобальных сетевых технологий. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
2. Столлингс В. Криптография и защита сетей: принципы и практика. 2-е изд. / Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.
3. Иванов М. А. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2001.
4. Молдовян Н. А., Молдовян А. А. Введение в криптосистемы с открытым ключом. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
5. Ростовцев А. Г., Маховенко Е. Б. Введение в криптографию с открытым ключом. СПб.: Мир и Семья, 2001.

*S. V. Shtanko, N. A., Zhukova*

#### *SCHEMES OF DATA AND USERS AUTHENTICATION IN DISTRIBUTED GIS*

*In the paper approaches to realization of functions of users and data authentication in distributed geoinformation systems, allowing to avoid shortcomings of existing protocols within the requirements to safety of geoinformation system are presented. The way of users personal keys storage on server side for a case when storage of user personal keys by on client side can not be realized is offered. The way of a binding of process of user identification to his geographical position is offered.*

**Distributed GIS, digital signature, authentication**



УДК 62-83

*В. А. Новиков, М. А. Ярыгин, А. С. Ануфриев*

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ РАБОЧИХ МАШИН И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*Рассмотрен системный подход к исследованию автоматизированных электроприводов машин и технологических комплексов, выполняемый на стадии принятия решения об оптимальном варианте электроприводов по совокупности альтернатив их создания. Используется обобщенный критерий качества, содержащий частные критерии, отражающие производительность, качество технологии и энергосбережение.*

**Системный анализ, многодвигательный автоматизированный электропривод, принятие решения по совокупности альтернатив создания электроприводов**

Большинство задач создания или модернизации автоматизированных электроприводов (АЭП) рабочих машин и технологических комплексов может быть решено с использованием типовых унифицированных средств электроприводов и систем автоматизации. Важным при этом является их выбор и компоновка в максимальной степени адаптированные к конкретному объекту и к режимам функционирования объекта в технологическом процессе. Следует особо отметить то, что современные высокодинамичные системы АЭП не только полностью обеспечивают решение разнообразных задач управления движениями в конкретной технологии, но и способствуют созданию новых машин и технологий. Поэтому в условиях большого разнообразия технических решений и вариантов технического и программного обеспечения систем необходимо иметь формализованный подход, с помощью которого можно свести процесс выбора структуры системы, технических и иных средств к последовательности оценок и действий для принятия оптимальных решений. Это важно еще и потому, что электротехнические компании и инжиниринговые фирмы, как правило, выполняют работы широкой отраслевой направленности для весьма разнообразных технологических объектов и наличие единого подхода к решению разнонаправленных задач существенно сокращает время выполнения предпроектных работ.

Целью статьи является изложение разработанной авторами методики системного анализа многодвигательных АЭП, выполняемого на стадии принятия решения об оптимальном варианте АЭП для конкретной технологии. Анализ проводится при условии мно-

говариантности решений в выполнении электротехнической, механической и технологической частей рабочих машин и технологических комплексов. Такой анализ является ключевым и, как правило, предопределяет содержание следующих этапов создания автоматизированных АЭП.

Процедуру проектирования сложных систем, к которым относятся рассматриваемые системы, выполняют с использованием методологии SADT, представляющей собой совокупность методов, правил и процедур, предназначенных для построения функциональной модели проектирования [1], [2]. Результатом применения методологии SADT является модель, которая состоит из диаграмм, фрагментов текстов и глоссария, имеющих ссылки друг на друга. Диаграммы – главные компоненты функциональных моделей, представляемых в виде блоков и дуг. Одной из наиболее важных особенностей методологии SADT является постепенное введение все больших уровней детализации по мере создания диаграмм, отображающих модель.

Изложенная ниже методика оперирует динамическими моделями и основана на проработке основных положений теорий системного анализа применительно к предметной области настоящей статьи. Методика включает в себя проработку вопросов: формирования частных и обобщенных критериев качества; классификации электроприводов, механизмов и технологий как единого целого; разработки математических моделей систем, подсистем и процессов; компьютерного моделирования и оптимизации систем; принятие решений о базовом варианте системы; выбор технических средств и разработку программного обеспечения.

Процедура выбора оптимального варианта системы управления многодвигательными электроприводами соответствует общей процедуре проектирования сложных систем управления, которая в соответствии с системно-техническим подходом сводится к решению таких типовых задач, как определение общей структуры системы, организации взаимодействия между подсистемами, учет влияния внешних воздействий, выбор оптимальных структур подсистем и выбор оптимальных алгоритмов функционирования системы. Проектирование ведется исходя из целей создания системы и решаемых ею задач в технологии. Оценка соответствия системы этим целям и задачам производится по критериям качества системы.

Общая постановка задачи принятия решения об оптимальном варианте системы выглядит следующим образом:

1. Имеется некоторое множество вариантов построения системы (альтернатив)  $A$ , причем каждая альтернатива  $\mathbf{a}_j$  характеризуется определенной совокупностью свойств  $a_1, a_2, \dots, a_n$ .

2. Имеется совокупность критериев  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , отражающих количественно множество свойств системы. Каждая альтернатива характеризуется вектором  $\mathbf{q}_j = [q_1(\mathbf{a}_j) q_2(\mathbf{a}_j) \dots q_n(\mathbf{a}_j)]^T, j = \overline{1, m}$ .

3. Необходимо принять решение о выборе альтернативы. Решение будет простым, если выбор производится по одному критерию, и сложным, если выбор производится по совокупности критериев.

Задача принятия решения по выбору альтернативы по совокупности критериев формально сводится к отысканию отображения  $Q$ , которое векторам  $\mathbf{a}_j$  и  $\mathbf{q}_i$  ставит в соответствие действительное число  $E = Q(\mathbf{a}_j, \mathbf{q}_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , определяющее степень предпочтительности данного решения. Оператор  $Q$  является обобщенным критерием, который присваивает каждому решению по выбору альтернативы соответствующее значение  $E$ . Это дает возможность упорядочить множество решений по степени предпочтительности.

Наиболее простой метод формирования обобщенного критерия заключается в том, что один из критериев  $q_k$  принимается в качестве обобщенного, а все остальные учитываются в виде ограничений, определяющих область допустимых альтернатив

$$Q = q_k \begin{cases} q_i \geq q_{i0}; & i = \overline{1, l}; \\ q_i < q_{i0}; & i = \overline{l+1, n}; \end{cases} \quad i \neq k,$$

где  $q_{i0}$  – допустимые значения по всем критериям, кроме  $q_k$ .

В этом случае задача сравнения альтернатив сводится к задаче принятия решений со скалярным критерием. Оценки альтернатив, не соответствующих заданным значениям  $q_{i0}$ , показывают, что альтернатива может дальше не рассматриваться.

Задача принятия оптимального решения при выборе альтернативы формулируется как задача математического программирования

$$\max_{a \in A} [q_k(\mathbf{a}_j)] \text{ либо } \min_{a \in A} [q_k(\mathbf{a}_j)],$$

$$q_i(\mathbf{a}_j) \geq q_{i0}; \quad i = \overline{1, l}; \quad q_i(\mathbf{a}_j) \leq q_{i0}; \quad i = \overline{l+1, n}; \quad i \neq k; \quad j = \overline{1, m}.$$

В тех случаях, когда невозможно выделить один из критериев  $q_k$  в качестве обобщенного, применяют более сложные методы представления обобщенного критерия, например в виде суммы

$$Q = \sum_{i=1}^n b_i q_i, \tag{1}$$

где  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – положительные или отрицательные коэффициенты.

Задачи оптимизации систем в такой постановке решаются методами системного анализа. При проектировании электромеханических систем используются частные критерии, включающие в себя оценки: производительности, динамической точности и качества технологии, электропотребления, надежности, сложности, масс и габаритов, стоимости, составляющих эксплуатационных показателей и др.

Наиболее значимыми для любых задач проектирования систем АЭП являются критерии, имеющие взаимосвязанные оценки производительности, динамической точности и качества технологии, электропотребления, стоимости (цены решения). Остальные частные критерии учитываются в виде ограничений. Важную роль при этом играет нормирование оценок, т. е. их представление в виде относительных величин. Необходимо также иметь обоснование значений коэффициентов  $b_i$ , устанавливающих веса частных критериев в обобщенном критерии.



Изложенная выше задача оптимизации может быть сведена, в частности, к известной задаче о ранце, которая формулируется следующим образом:

Дано  $k$  предметов; каждый  $i$ -й предмет имеет массу  $w_i > 0$  и стоимость  $p_i > 0$ ,  $i = \overline{1, k}$ . Необходимо выбрать из этих предметов такой набор, чтобы суммарная масса не превосходила заданной величины  $W$  (емкость ранца), а суммарная полезность предметов была максимальной.

Другими словами, нужно определить набор бинарных величин  $(b_1, b_2, \dots, b_k)$ , такой, чтобы

$$b_1 w_1 + b_2 w_2 + \dots + b_k w_k \leq W,$$

а сумма величин  $b_1 p_1 + b_2 p_2 + \dots + b_k p_k$  была максимальной.

Величина  $b_i$  равна 1, если  $i$ -й предмет включается в набор, и равна 0 в противном случае.

Задача о ранце сводится к выбору вариантов частей системы с учетом общего ресурсного ограничения, максимизации общей «полезности» выбранных вариантов и соответствует задаче построения конфигурации системы. Задача рассматриваемого типа является также составной частью более сложных задач комбинаторной оптимизации.

Для решения задачи используют разнообразные методы, например

- переборные точные методы (метод ветвей и границ, метод динамического программирования и их комбинации);
- приближенные алгоритмы с гарантированной погрешностью (по целевой функции, по ограничениям),
- генетические алгоритмы и многокритериальные эволюционные схемы решений.

Используя метод «ветвей и границ», сначала решают линеаризованную задачу, применив несколько критериев доминирования для отбрасывания бесперспективных вариантов, а затем решают редуцированную блочную задачу с помощью переборных схем. При этом на каждом шаге требуется вычисление верхних границ, для чего необходимо решать линеаризованную блочную задачу с новыми начальными условиями. Существенную вычислительную сложность представляет первый этап – проверка на доминирование, а также многократное повторение второго этапа. В результате алгоритмы имеют высокую вычислительную сложность.

При использовании метода динамического программирования выполняют перебор с применением критериев доминирования. Для решения задачи также применяют псевдолинейные алгоритмы, основанные на поиске «ядра» решения из перспективных вариантов с последующим расширением его с помощью динамического программирования.

В работе [3] дан подробный анализ методов решения таких задач и предложен эвристический алгоритм для многокритериальной блочной задачи о ранце, позволяющий сократить вычислительную сложность алгоритмов. Предлагается сначала найти перспективное решение, удовлетворяющее ресурсному ограничению, путем последовательных переходов (замен элементов) с минимальным уменьшением полезности или относительной полезностью набора от наилучшего решения, выбранного без учета ресурсного ограничения. После этого элементы перспективного решения заменяются элементами с меньшими ре-

сурсными требованиями. Затем для полученного «ухудшенного» решения с помощью динамического программирования из ранее замененных элементов ищется оптимальный набор, максимально улучшающий решение, удовлетворяя при этом ресурсному ограничению.

При решении задач оптимизации систем кроме указанных методов программирования используются и другие, в частности, методы, входящие в программные пакеты MATLAB и MathCAD.

Все эти методы при большом числе вариантов решений характеризуются высокой вычислительной сложностью. Некоторое их упрощение достигается чисто математическими манипуляциями и разного рода условиями ограничений. При создании сложных электроприводных систем упрощение можно делать как на математическом уровне, так и на уровне технических решений с учетом отработанных методов управления и декомпозиции систем.

Рационально использовать следующую методику принятия решения об оптимальном варианте системы АЭП по совокупности нескольких альтернатив ее создания:

1. Формирование  $m$  вариантов решений (выполнения системы), включающих в себя сочетания разных компонентов электротехнической, механической и технологической подсистем (рекуперация в сеть переменного или постоянного тока, с редукторами или без редукторов, с дополнительными исполнительными органами и др.). Предварительный выбор структур системы и электрооборудования. Выполнить этот этап удобно, если использовать содержание ячеек матрицы модулей (рис. 1, а), составленной в соответствии с классификацией выше названных подсистем [4], [5]. Такая классификация выполняется по группам, подгруппам и отдельным решениям в каждой подсистеме.

2. Формулирование частных и обобщенных критериев оптимизации системы. Из большого числа частных критериев выделяются три главных критерия, отражающие нормированные оценки производительности, качества технологии, электропотребление для каждого варианта; остальные представляются в виде ограничений. Обобщенный критерий записывается в виде стоимостной суммы (1) с положительными весовыми коэффициентами, отражающими стоимостный вклад каждого частного критерия в суммарную оценку.

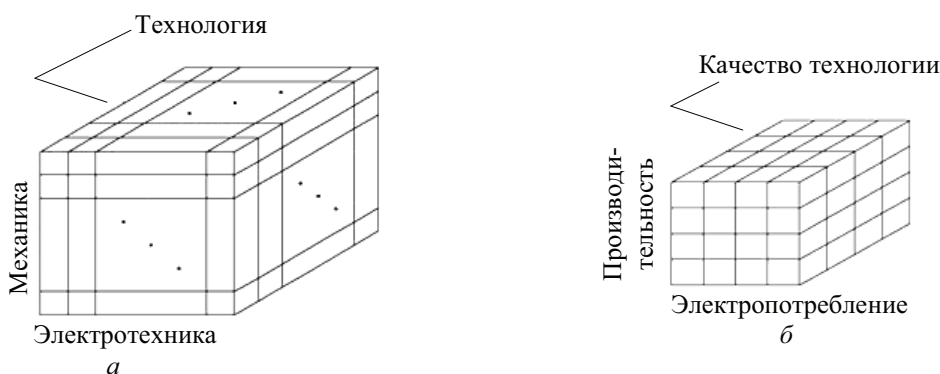


Рис. 1

3. Составление упрощенных линеаризованных математических моделей, описывающих каждый вариант решения. Эти модели представляют собой модели-блоки, так как они составлены из моделей-модулей, присутствующих вместе с моделями связей в ячейках матрицы модулей. В подобных моделях кроме традиционных переменных, используемых

для описания движений, имеются переменные, применяемые для оценки точности технологии, электропотребления, установленной мощности оборудования, потерь энергии и т. п., необходимые для частных критериев. Используются относительные значения переменных. В качестве базовых принимаются значения, указанные в техническом задании, и значения, указанные в характеристиках продвинутых рыночных изделий.

4. Компьютерное моделирование  $n$  систем с задающими и возмущающими воздействиями, соответствующими технологии. Исследование непрерывных, циклических и комбинированных режимов работы оборудования.

5. Получение из итогов моделирования нормированных оценок производительности, качества технологии, электропотребления для каждого варианта. Выбор из  $n$  вариантов системы  $k$  вариантов, отвечающих заданным нормированным значениям оценок. Такой выбор выполняется по итогам ранжирования  $n$  систем в соответствии с ячейками матрицы блоков (рис. 1, б), размер которой зависит от числа и пределов ранжирования оценок производительности, качества технологии, электропотребления. В простейшем случае эта матрица имеет размер  $3 \times 3 \times 3$  и может быть сформирована, например, с пределами оценок: «меньше» (0,7...0,9), «норма» (0,9...1,1), «больше» (1,1...1,3).

6. Обоснование и выбор значений весовых коэффициентов нормированных частных критериев в нормированном обобщенном критерии. Оптимизация  $k$  вариантов систем в соответствии с нормированным обобщенным критерием, оценка которого выполняется в виде относительной цены варианта. Базовой ценой является усредненная цена электрооборудования, сложившаяся на рынке в настоящий момент времени. Варьируемыми переменными, по которым выполняется оптимизация систем, являются обобщенные нормированные оценки частот: среза контуров регулирования, упругих колебаний механических элементов, широтно-импульсных модуляций электронных устройств.

7. Принимая во внимание большое влияние производительности на цену варианта, можно оптимизацию выполнять по двум частным критериям – качеству технологии и электропотреблению при заданных значениях производительности.

8. Принятие решения о базовом варианте системы для дальнейшего проектирования по итогам оптимизации всех  $k$  вариантов систем. Уточненный выбор электрооборудования системы.

Моделирование базового варианта системы по полным моделям подсистем, получение уточненных оценок обобщенного и частных критериев качества.

В наиболее общем виде каждая подсистема описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = F_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{f}, \mathbf{a}, t); \quad \gamma = F_2(\mathbf{x}, \mathbf{a}),$$

или

$$\dot{\mathbf{x}} = A(\mathbf{x}, \mathbf{a}, t)\mathbf{x} + B(\mathbf{x}, \mathbf{a}, t)\mathbf{u} + D(\mathbf{x}, \mathbf{a}, t)\mathbf{f};$$

$$\mathbf{y} = C\mathbf{x};$$

$$\gamma = F_2(\mathbf{x}, \mathbf{a}),$$

где  $A(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}, t), B(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}, t), D(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}, t)$  – матрицы состояния, управления и возмущения соответственно;  $C$  – масштабная матрица;  $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{f}, \mathbf{y}$  – векторы переменных состояния, управления, возмущения и измеряемых переменных соответственно;  $\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\alpha}$  – векторы оценок показателей частных критериев качества и варьируемых параметров систем управления.

Выбор формы математического описания связан с выбором программной среды, в которой выполняется компьютерное моделирование вариантов системы. Если такой средой является MATLAB-Simulink, то описание выполняется также с использованием алгоритмических структурных схем, полностью соответствующих нелинейным дифференциальным уравнениям системы. Важно при этом качественно выполнять математическое описание технологической подсистемы, включающей в себя исполнительные органы машины, объединенные обрабатываемым материалом. Следует подчеркнуть то, что именно управление технологическими переменными диктует необходимость управления механическими, а через них и электромагнитными переменными. В соответствии с этим устанавливаются виды оценок показателей качества управления переменными каждого уровня и уточняются ограничения переменных, обусловленные особенностями выбранного электрооборудования.

Изложенная методика применена к исследованию и оптимизации многодвигательного АЭП продольно-резательного станка. Результаты оптимизации цены ( $\Pi$ ), при трех значениях нормированной производительности ( $P$ ) показаны на рис. 2. Данные поверхности получены в прикладном пакете MathCAD с помощью функции *cspline*. На рисунке обозначены:  $\delta$  – качество технологии;  $S$  – электропотребление. Найдя сечения поверхностей оптимизации при определенных нормированных значениях оценок, можно получить зависимости цены ( $\Pi_r$ ) от производительности ( $P$ ) при заданном качестве технологии ( $\delta$ ) и разных значениях электропотребления ( $S$ ) (рис. 3), а также иные зависимости цены от названных оценок.

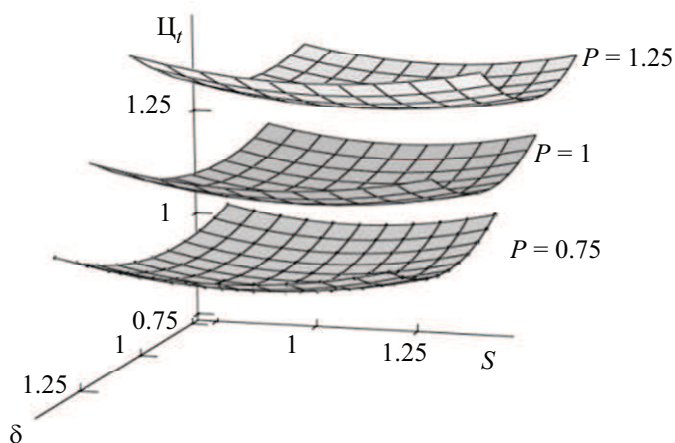


Рис. 2

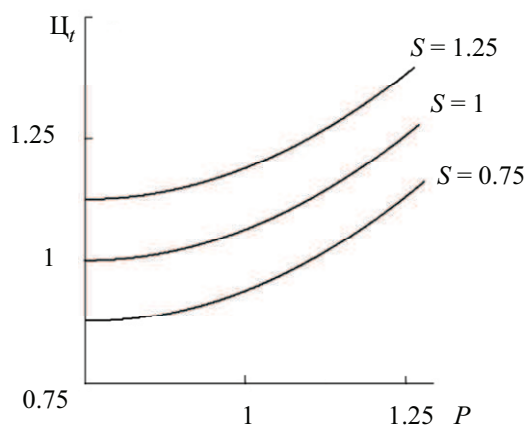


Рис. 3

Альтернативные варианты многодвигательных АЭП станка формировались из следующих вариантов выполнения подсистем: в технологической подсистеме – из применения одного или двух ведущих валов, осевого или с транспортером смотки раската; в механической подсистеме – редукторных или безредукторных вариантов раската, наката и ведущих валов; в электротехнической (электромагнитной) подсистеме – силовые электрические

схемы с групповым или автономными источниками электропитания инверторов всех приводов, с рекуперацией энергии торможения в сеть постоянного или переменного токов, использования синхронных или асинхронных двигателей ведущих валов. Данные станка и системы управления, а также результаты компьютерных и промышленных исследований систем АЭП станка приведены в работе [6].

В заключение отметим следующее:

1. Изложенная методика применима к широкому классу объектов.
2. Матрицы модулей и блоков, содержащие математические модели вариантов решений, являются открытыми матрицами, дающими возможность накапливать и уточнять информацию по отдельным решениям в создании разнообразных систем АЭП для технологий и, таким образом, создавать базу данных для различных решений.
3. Математические модели вариантов решений, доработанные в конкретной программной среде, служат основой для подготовки многомодульных и многоблочных программных средств электроприводных систем [7], используемых как для отладки алгоритмов управления, так и для управления технологией в соответствии с моделью технологического процесса.
4. Поверхности решений и сечения этих поверхностей дают наглядное представление о возможном дрейфе оценок в случае вынужденных изменений решений в ходе создания систем АЭП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

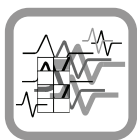
1. Вендров А. М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем – М.: Финансы и статистика, 2002. – 349 с.
2. Прокофьев Г. И. Ранние стадии создания продукции: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 63 с.: ил., табл. Библиогр.: с. 59.
3. Левин М. Ш., Сафонов А. В. Эвристический алгоритм для многокритериальной блочной задачи о рюкзаке. // Искусственный интеллект и принятие решений, 2009. № 4. С. 53–64.
4. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем / А. А. Колесников, В. Б. Яковлев, В. А. Новиков и др.; под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч. 3. 656 с.
5. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебное пособие для вузов. М.: Изд. центр «Академия», 2004.
6. Горев М. В., Новиков В. А. Исследование динамических характеристик электроприводных систем резательных станков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. Вып. 9. С. 79–86.
7. Ануфриев А. С., Новиков В. А. Многоблочные и многомодульные программные средства электроприводных систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. Вып. 5. С. 28–37.

*V. A. Novikov, M. A. Yaryigin, A. S. Anufriev*

#### *SYSTEM ANALYSIS OF MULTI-MOTOR AUTOMATED ELECTRIC DRIVERS FOR WORKING MACHINES AND TECHNOLOGICAL COMPLEXES*

*The article describes the system approach to the research of automated electric drivers for working machines and technological complexes. Such the research is performed at the stage of decision-making on the best choice of electric drivers based on different options for its creation. The article provides the reasonableness of quality criteria such as performance efficiency (output measure), technology and energy savings.*

**System analysis, multimotor automated electric driver, decision-making based on different options for creation of electric drivers**



УДК 681.2.0.84-192

Е. О. Грубо, П. Г. Королев, А. В. Утушкина

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕДУР КОРРЕКЦИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

*Рассмотрены структурные решения, применяемые в средствах измерения с автоматической коррекцией. Проведен анализ параметров, влияющих на метрологическую надежность, описаны алгоритмические решения, направленные на снижение влияния этих параметров, оценена эффективность процедур коррекции.*

**Метрологическая надежность, автоматическая коррекция погрешностей, эффективность коррекции**

**Средства измерений с автокалибровкой.** Одним из наиболее важных показателей, характеризующих качество средства измерения (СИ), является метрологическая надежность, свойство СИ сохранять во времени свои метрологические характеристики в заданных пределах.

Современные средства измерения, как правило, имеют в своем составе встроенную подсистему автоматической коррекции погрешностей. Методы автоматической коррекции основаны на введении в состав СИ аппаратной и программной избыточности и выполнении дополнительных измерений, результаты которых позволяют получить информацию не только об измеряемой величине, но и о погрешностях, возникающих в процессе измерения (и исключить эти погрешности из результата измерения). Анализ полученных данных позволяет строить математические модели изменения во времени метрологических характеристик СИ, определять параметры метрологической надежности (метрологический ресурс, вероятность безотказной работы, межповерочный или межкалибровочный интервал), планировать сроки работ по метрологическому обслуживанию.

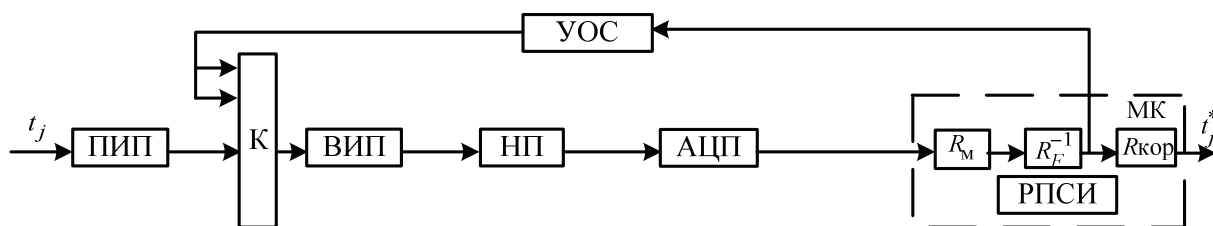


Рис. 1

Для исследования процесса деградации метрологических характеристик и исследования эффективности работы подсистемы коррекции реализована модель измерительного канала (ИК) температуры с автоматической коррекцией погрешностей на базе метода образцовых сигналов в виде виртуального прибора. На рис. 1 представлена структурная схема измерительного канала температуры [1].

В состав ИК входят: ПИП – первичный измерительный преобразователь; ВИП – вторичный измерительный преобразователь; НП – нормирующий преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; УОС – устройство образцовых сигналов; МК – микроконтроллер; РПСИ – регистратор параметров средства измерения [2].

С помощью устройства образцовых сигналов вырабатываются сигналы в реперных точках.

Алгоритм работы подсистемы коррекции содержит следующие операции:

1. В режиме «Измерение» фиксируется значение  $t_j^*$ , соответствующее текущему значению измеряемой температуры  $t_j(\tau)$ :

$$t_j^* = R_F^{-1} R_M R_{a-ц} R_{НП} R_{ВИП} R_{ПИП} t_j(\tau), \quad (1)$$

где  $R_{ПИП}$  – оператор первичного преобразования измеряемой величины;  $R_{ВИП}$  – оператор вторичного преобразования измеряемой величины;  $R_{НП}$  – оператор масштабирования (нормализация);  $R_{a-ц}$  – оператор аналого-цифрового преобразования;  $R_M$  – оператор масштабирования;  $R_F^{-1}$  – оператор, реализующий обратное функциональное (градуировочное) преобразование.

2. В режиме «Автокалибровка» на вход вторичного измерительного преобразователя при помощи идентификатора команд  $q$  (задание образцовых сигналов) от УОС последовательно подключаются образцовые сопротивления  $r_{oi}$ , соответствующие значениям температуры в реперных точках диапазона измерения ИК. Номинальные значения образцовых сопротивлений определяются по номинальной характеристике преобразования ИК  $y'_H$ :

$$r_{Hi} = y'_H(r_{oi}).$$

3. Образцовые значения  $r_{oi}$  измеряются в соответствии с уравнением измерения (1):

$$r_{oi}^* = R_F^{-1} R_M R_{a-ц} R_{НП} R_{ВИП} r_{oi}(t_i).$$

4. Формируется массив погрешностей:

$$\{\Delta_{oi}\} = \{r_{oi}^* - r_{Hi}\}_{i=1}^k. \quad (2)$$

5. Определяются параметры корректирующей функции:

$$z(t_j) = R_B \{b_i\},$$

где  $R_B$  – вспомогательный оператор вычисления коэффициентов уравнения (2).

6. Поскольку  $\Delta_0$  и ее характеристики изменяются в диапазоне измерения, значение поправки выбирается в зависимости от входной величины  $t_j$  (определяется по функции обратной номинальной характеристики преобразования  $t_j = y_H^{-1}(t_j^*)$ ). Корректирующая функция:

$$R_{\text{кор}} = R_z z(t_j),$$

где  $R_{\text{кор}}$  – оператор введения коррекции погрешности;  $R_z$  – оператор выбора значения поправки.

7. Коррекция результата измерений с учетом поправки:

$$t_j^* = R_{\text{кор}} t_j^*(\tau).$$

Состав полной погрешности запишется в соответствии со схемой вычисления полной погрешности, представленной на рис. 2, где  $\Delta t_j^*$  – полная погрешность результата измерения;  $\Delta_{\text{к}} t_j^*$  – погрешность, возникающая в результате неидеальности процедур коррекции;  $\Delta_{\text{ПИП}} t_j^*$  – трансформированная погрешность из-за отличия реальной характеристики преобразования первичного измерительного преобразователя от номинальной. При этом погрешность неидеальности процедур коррекции складывается из неучтенного остатка основной погрешности  $\Delta_{\text{н.о}} t_j^*$ , погрешности от аппроксимации  $\Delta_{\text{а}} t_j^*$ , погрешности квантования  $\Delta_{\text{к}} t_j^*$ , а также погрешностей вычисления, возникающих ввиду ограниченности разрядной сетки вычислительного устройства.

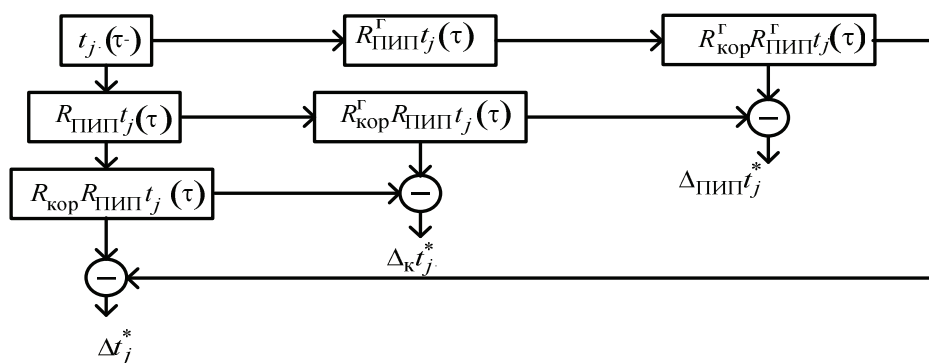


Рис. 2

**Эффективность корректировочных процедур.** Корректировочные процедуры применяются для удержания погрешности СИ в установленных пределах в течение длительных промежутков времени. Коррекция считается эффективной, если основная погрешность СИ не выходит за установленные допустимые пределы в течение заданного времени.

Если через  $\mathcal{E}_{\text{к}}$  обозначить отношение характеристики погрешности без коррекции  $\theta[\Delta t_j^*]$  к характеристике погрешности СИ, полученной с учетом коррекции  $\theta[\Delta_{\text{к}} t_j^*]$ , т. е. считать, что коррекция уменьшает погрешность СИ в  $\mathcal{E}_{\text{к}}$  раз, то, согласно [3], можно определить эффективность коррекции как



$$\mathcal{E}_k = \frac{\theta[\Delta t_j^*]}{\theta[\Delta_k t_j^*]}. \quad (3)$$

Чем больше  $\mathcal{E}_k$ , тем эффективнее коррекция. **Коррекция считается неэффективной:**

- если в результате выполнения автокалибровочных процедур и внесения поправки точность СИ не улучшается;
- в течение интервала между автокалибровками скорректированная погрешность СИ успевает приблизиться к допустимому значению либо превзойти его;
- основная погрешность СИ превышает за установленные допустимые значения.

**Причиной неэффективности** коррекции могут быть следующие факторы:

- наличие случайной составляющей полной погрешности;
- некорректный выбор интервала между автокалибровками;
- метрологический отказ.

Для анализа и снижения факторов, влияющих на эффективность коррекции, разработан алгоритм функционирования подсистемы встроенного метрологического контроля.

Основные анализируемые параметры алгоритма:

- минимальный уровень входной величины;
- максимальный уровень входной величины;
- номиналы образцовых резисторов;
- скорость нарастания мультипликативной погрешности ВИП;
- скорость нарастания аддитивной погрешности НП;
- скорость нарастания мультипликативной погрешности НП;
- скорость нарастания аддитивной погрешности АЦП;
- скорость нарастания мультипликативной погрешности АЦП;
- среднее квадратическое отклонение шума;
- коэффициенты реальной характеристики преобразования;
- время последней однократной калибровки;
- время последней многократной калибровки;
- интервал времени, за который происходит одно измерение;
- интервал прогнозирования основной погрешности;
- интервал времени между однократными калибровочными измерениями;
- минимальный интервал времени между однократными калибровочными измерениями;
- интервал времени между многократными калибровочными измерениями;
- интервал времени между нарастанием составляющих погрешности;
- пороговый уровень значения основной погрешности для более высокого класса точности;
- пороговый уровень значения основной погрешности для более низкого класса точности.

Алгоритм позволяет оценивать скорость дрейфа систематической и случайной составляющих погрешности и устанавливать интервалы периодичности осуществления автокалибровок, а также изменять объем выборки при многократных автокалибровках в зависимости от значения дисперсии случайной составляющей. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

Исходя из рекомендаций ГОСТ 8.009–84, а также для ограничения влияния случайной составляющей на коррекцию в ходе выполнения многократной автокалибровки осуществляется контроль соотношения  $\frac{\sigma[\dot{\Delta}_o]}{\Delta_{osp}}$ , где  $\sigma[\dot{\Delta}_o]$  – среднее квадратическое отклонение случайной составляющей основной погрешности СИ;  $\Delta_{osp}$  – предел допустимой систематической составляющей основной погрешности, а также скорость дрейфа случайной составляющей погрешности. В условиях, когда значение случайной составляющей становится существенным (это происходит при выполнении неравенства (блок 20)), алгоритм переходит в режим многократных автокалибровок. Все полученные данные регистрируются в энергонезависимом запоминающем устройстве и далее анализируются в регистраторе параметров СИ. Такого рода избыточность, не влияя существенно на работу основного измерительного тракта, позволяет строить более гибкие алгоритмические решения, повышая тем самым эффективность коррекции и увеличивая метрологический ресурс.

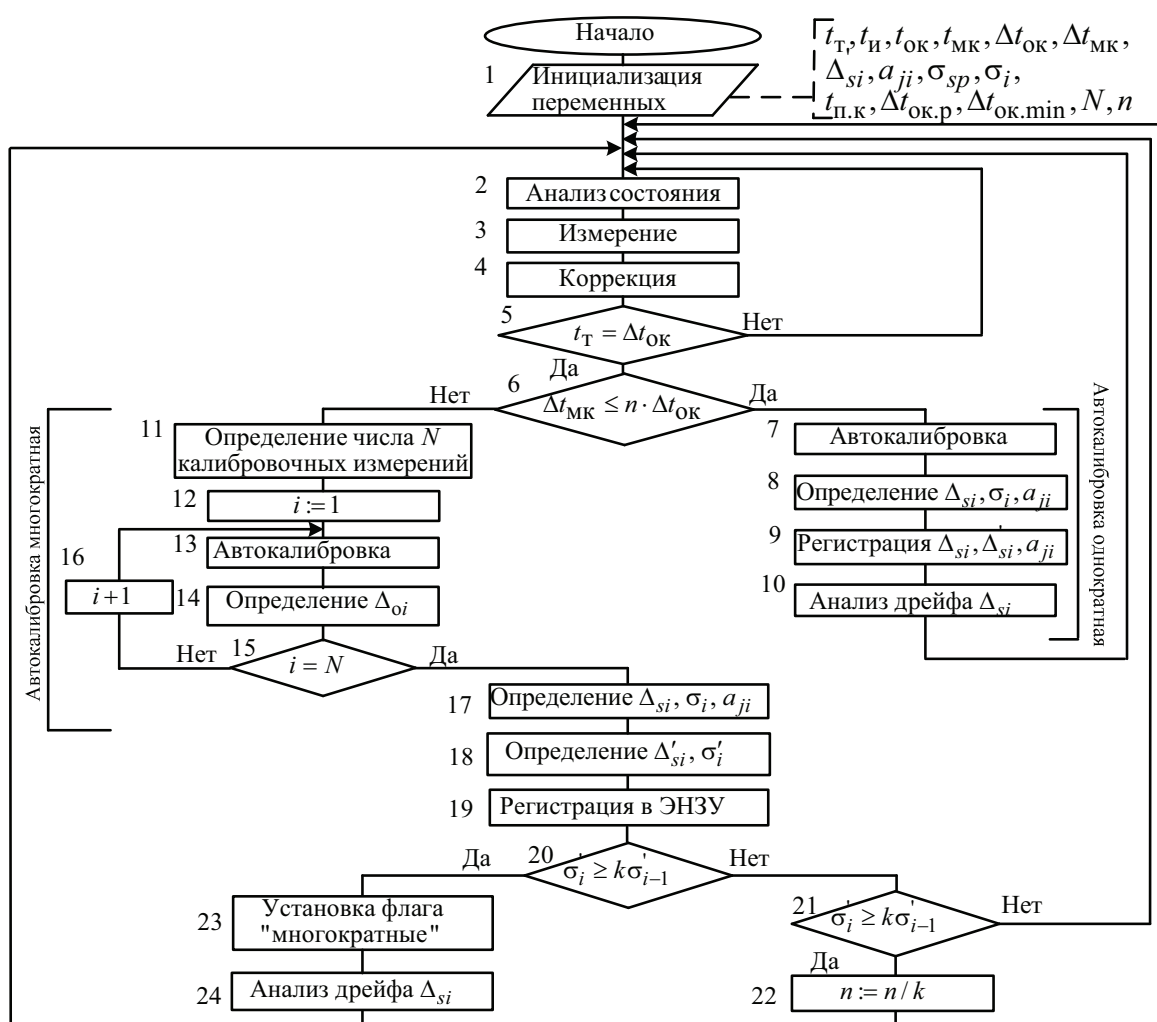


Рис. 3

Подпрограмма «Анализ дрейфа  $\Delta_{si}$ », входящая в состав алгоритма, позволяет анализировать дрейф систематической составляющей погрешности и скорости ее нарастания. Блок-схема подпрограммы «Анализ дрейфа  $\Delta_{si}$ » приведена на рис. 4.

В блоке 2 проверяется условие: не превосходит ли полученное значение  $\Delta_{si}$  установленного порогового уровня  $\Delta_{op1}$ . Если неравенство выполняется, то далее контролируется скорость дрейфа систематической составляющей погрешности. Если обнаружено ускорение (блок 3), причем такое, что скорость дрейфа успела возрасти в  $c$  раз по сравнению с предыдущим значением, межкалибровочный интервал сокращается в  $c$  раз (блок 4). После этого в блоке 5 осуществляется проверка: не сократился ли межкалибровочный интервал до значения, меньшего минимально допустимого. Если это произошло, то пользователь получает сообщение «Критическое сокращение  $\Delta t_{ок}$ » и  $\Delta t_{ок.p}$  назначается  $\Delta t_{ок.min}$  (блок 7).

Если неравенство в блоке 2 не выполняется, производится проверка на наличие метрологического отказа (блок 8). Происходит это следующим образом: если основная погрешность прибора превышает допустимые пределы основной погрешности для более низкого класса точности  $\Delta_{op2}$ , то коррекция считается неэффективной и пользователь получает сообщение: «метрологический отказ» (блок 11), после чего алгоритм заканчивает работу; если условие не выполняется, то рабочий межкалибровочный интервал устанавливается минимально допустимым (блок 9) и пользователь получает сообщение о том, что необходимо произвести поверку (блок 10).

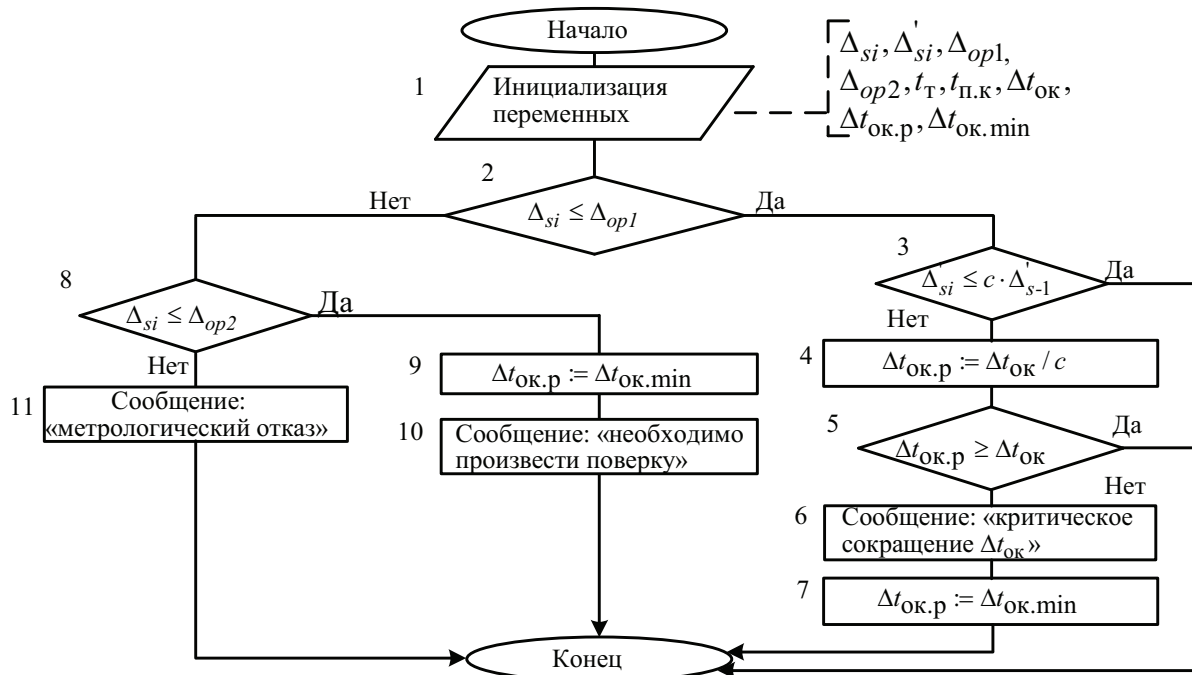


Рис. 4

При исследовании модели измерительного канала температуры, реализующей данные алгоритмы коррекции, получены результаты, позволяющие оценить эффективность процедур коррекции. Сравнение проводилось для двух моделей автоматической коррекции: модели ИК, использующей алгоритмы подстройки (учитывающие изменения во времени систематической и случайной составляющих погрешности), и модели ИК, работающей с фиксированным межкалибровочным интервалом. Оценка эффективности с учетом (3):

$$\Theta_k = \frac{\theta[\Delta_{к.ф} t_j^*]}{\theta[\Delta_{к.а} t_j^*]},$$

где  $\theta[\Delta_{к.ф}t_j^*]$  – оценка характеристики погрешности, полученной по результатам работы подсистемы коррекции с фиксированным межкалибровочным интервалом;  $\theta[\Delta_{к.а}t_j^*]$  – оценка характеристики погрешности, полученной по результатам работы подсистемы коррекции с адаптивными алгоритмами.

Результаты исследований показали, что использование адаптивных алгоритмов коррекции, в зависимости от соотношений скорости нарастания случайной и систематической погрешностей, повышает эффективность коррекции в 1,8 ... 5 раз по отношению к алгоритмам коррекции с фиксированными параметрами.

Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы «Создание интеллектуальной системы мониторинга и управления энергопотреблением с прогнозируемым метрологическим ресурсом в зданиях и сооружениях», проводимой в СПбГЭТУ (госконтракт № 16.516.11.6039).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. В., Грубо Е. О., Королев П. Г. Принципы построения средств измерений с коррекцией составляющих полной погрешности // Приборы. 2010. № 7. С. 57–63.
2. Алексеев В. В., Грубо Е. О., Королев П. Г. Структуры и алгоритмы коррекции основной погрешности измерительного канала с использованием измеряемой величины // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. № 4(19). С. 23–32.
3. Цветков Э. И. Основы математической метрологии. СПб.: Политехника, 2005.

*E. O. Grubo, P. G. Korolev, A. V. Utushkina*

#### *EFFICIENCY OF AUTOMATIC ERROR CORRECTION PROCEDURES OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF MEASURING EQUIPMENT*

*Are observed applicable in measuring equipment with automatic error correction structural decisions. Is carried out parameter analysis affecting on metrological reliability; are described decision algorithms targeted to increasing these parameters influence, is; carried out efficiency evaluation of automatic error correction procedures.*

**metrological reliability, automatic error correction, automatic error correction efficiency**

УДК 674.028.9, 620.179.161

***А. Н. Чубинский, А. А. Федяев,  
К. С. Паврос, А. В. Теплякова, А. А. Лозак***

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА ПРИ ПРОЗВУЧИВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ**

*Определено влияние плотности древесины и угла наклона годовичных колец на угол отклонения ультразвукового (УЗ) пучка при использовании теневого метода прозвучивания древесины. Сформулированы требования для размеров преобразователей при проведении максимально-достоверного контроля клееных конструкций.*

**Ультразвуковой контроль, клееные древесные конструкции, склеивание древесины, годовичные слои, контроль древесины**

Древесина как предмет физико-механической обработки и контроля свойств является растительным высокополимерным веществом, имеющим сложное анатомическое строение и явно выраженное различие свойств в разных направлениях, связанных с направлением волокон [1], [2]. Анизотропия древесины является следствием ее неоднородного строения как на макро-, так и мезо-, микро- и наноровнях.

Характерными элементами макростроения являются годовичные слои, образующие на поперечном срезе близкие к концентрическим кольца различной ширины (как правило, от 1 до 10 мм). Годичный слой состоит из двух частей: ранней менее плотной и поздней более плотной древесины. Размеры и плотность годовичных слоев зависят от геоклиматических условий произрастания.

Мезо- и микроструктурные различия вызваны неоднородностью расположения и различием размеров основных структурных элементов – клеток древесины (у хвойных пород – трахеид: ранних и поздних).

Наноструктурные различия заложены в клеточной стенке, обеспечивающей механическую прочность древесины как конструкционного материала и имеющей слоистое строение.

Клеточная стенка состоит из элементарных фибрилл (пучков макромолекул целлюлозы), объединенных в микрофибриллы, представляющие собой лентоподобные волокна.

Микрофибриллы по-разному упакованы в различных частях (оболочках) клеточной стенки – ориентированными и неориентированными слоями.

Таким образом, вещество древесины, с одной стороны, представляет собой структурное образование с определенными ориентированными элементами (годовичные слои, древесные клетки, клеточные стенки), а с другой – физическая и размерная неоднородность этих элементов, их расположения в разных древостоях не позволяют распространять характер анизотропии, присущий этим построениям, даже на элементарные объемы древесины.

Описанное ранее строение древесины существенно влияет на определение ее физических свойств. В частности, при сквозном прозвучивании [3] наблюдается отклонение звукового пучка от оси прозвучивания. На рис. 1 показана схема контроля качества клееного соединения двух ламелей при использовании теневого метода: 1 – генератор, 2 – излучатель (пьезоэлектрический преобразователь), 3 – склеенные ламели, 4 – слой клея, 5 – дефект склейки, 6 – контактные слои, 7 – приемник (пьезоэлектрический преобразователь), 8 – усилитель, 9 – осциллограф.

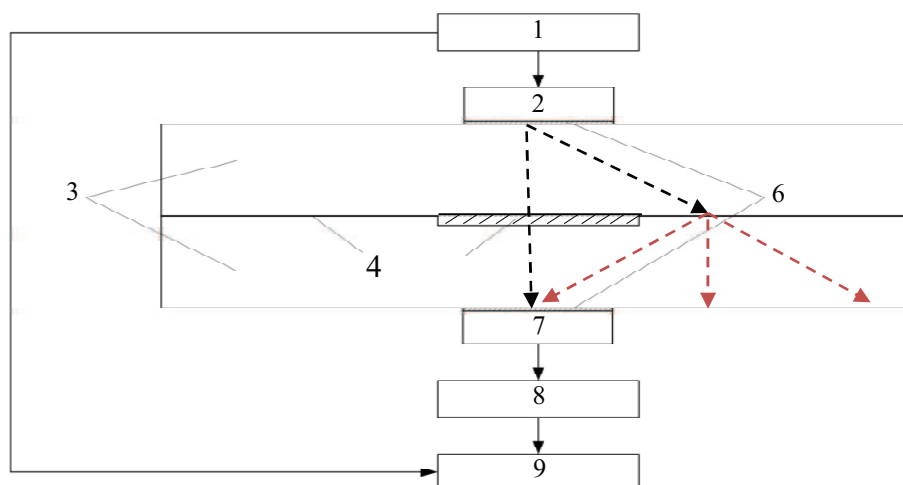


Рис. 1

Как видно из рисунка, отклонение УЗ-пучка от оси может существенно повлиять на достоверность результатов контроля и точность определения размеров и расположения дефектов.

**Методика исследования.** Угол отклонения ультразвука от оси прозвучивания исследовался на ламелях (образцах) из древесины сосны известной плотности длиной 156 мм, шириной 85 мм, толщиной 26.5 мм с разным углом наклона годовичных слоев, влажностью  $12 \pm 2 \%$ ,

шероховатостью поверхности  $24 \pm 8$  мкм. Условия окружающей среды: относительная влажность воздуха  $65 \pm 5$  %, температура  $-20 \pm 2$  °С. Для возбуждения и приема УЗ-пучка использовался ультразвуковой дефектоскоп «А-1214 ЭКСПЕРТ». Предварительные исследования [4] показали, что высокая точность результата для исследуемых ламелей может быть получена на частоте 2.5 МГц. На этой частоте минимизируется ошибка, связанная с потерей волны, а затухание УЗ-сигнала в материале позволяет уверенно принимать прошедший через образец сигнал. Измерения проводились с использованием двух пьезопреобразователей ПЭП 111-2.5-К12.

Схема проведения измерений представлена на рис. 2. Излучатель устанавливался на одной из поверхностей образца, перемещением приемного преобразователя по противоположной поверхности достигался максимум амплитуды прошедшего сигнала. На рис. 3 показано отклонение звукового пучка от оси прозвучивания:  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – смещение преобразователей друг относительно друга по двум осям  $x$  и  $y$  соответственно при максимальной амплитуде прошедшего сигнала;  $R$  – «смещение» годичного кольца;  $h$  – толщина образца;  $F$  – угол наклона слоя, который вычисляется как  $F = \arctg(R/h)$ ;  $\delta x$  – угол отклонения по  $x$ ;  $\delta y$  – угол отклонения по  $y$ ;  $\delta xy$  – угол отклонения по двум осям  $x$  и  $y$ .

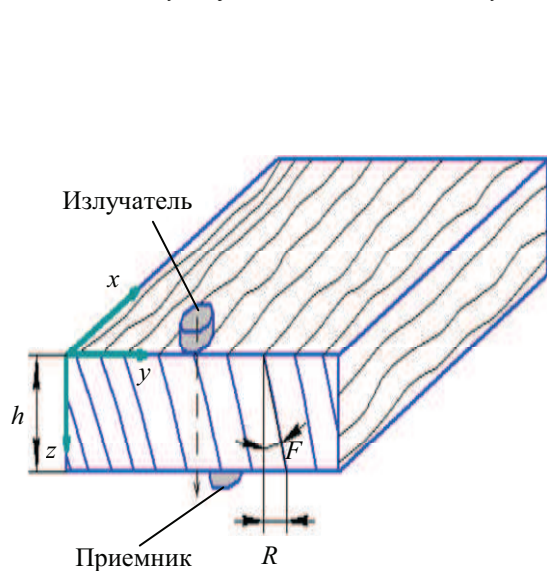


Рис. 2

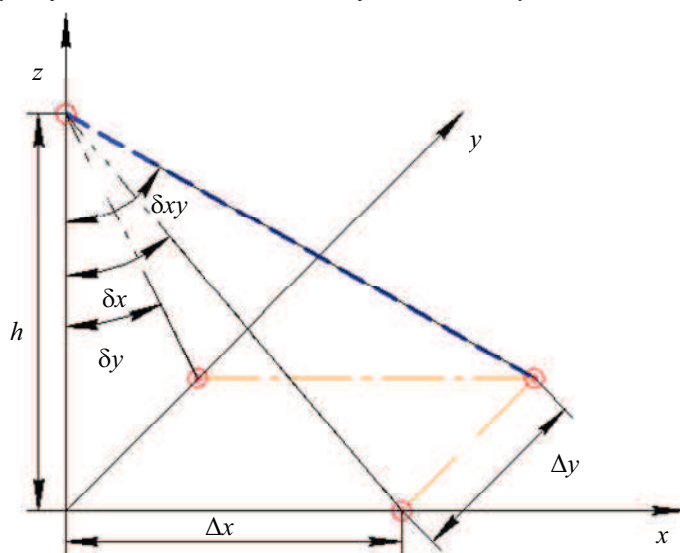


Рис. 3

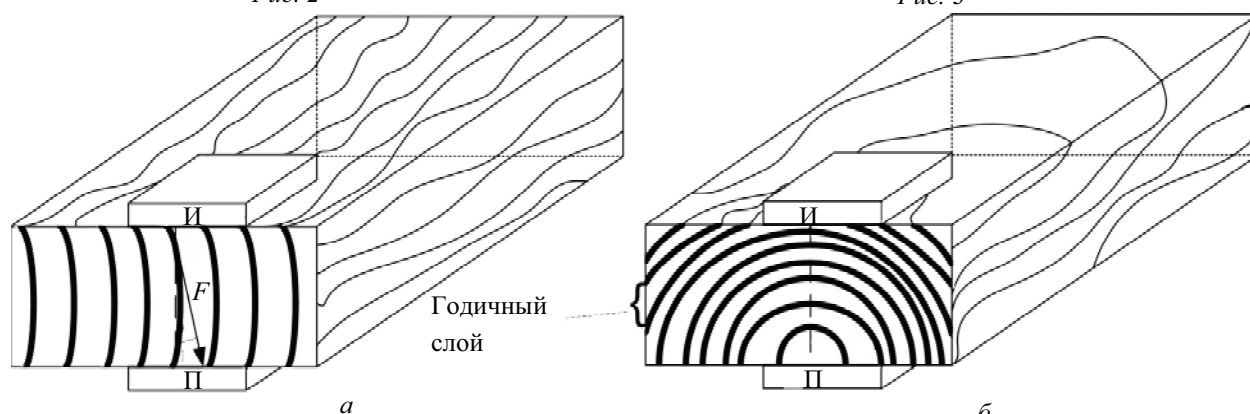


Рис. 4

**Результаты исследований и их анализ.** При прохождении УЗ-пучка через образец наблюдается его пространственное смещение, зависящее от структуры и плотности древесины (рис. 4 – схематическое изображение смещения ультразвукового импульса в зависи-

мости от макроструктуры древесины – расположения годичных слоев на поперечном срезе и вида пиломатериала (радиальные, полурадиальные, тангенциальные): *a* – радиальный пиломатериал; *b* – тангенциальный пиломатериал. И – излучающий преобразователь, П – приемный преобразователь). Отклонение УЗ-пучка связано со слоистой структурой образцов, образованной годичными кольцами разной плотности.

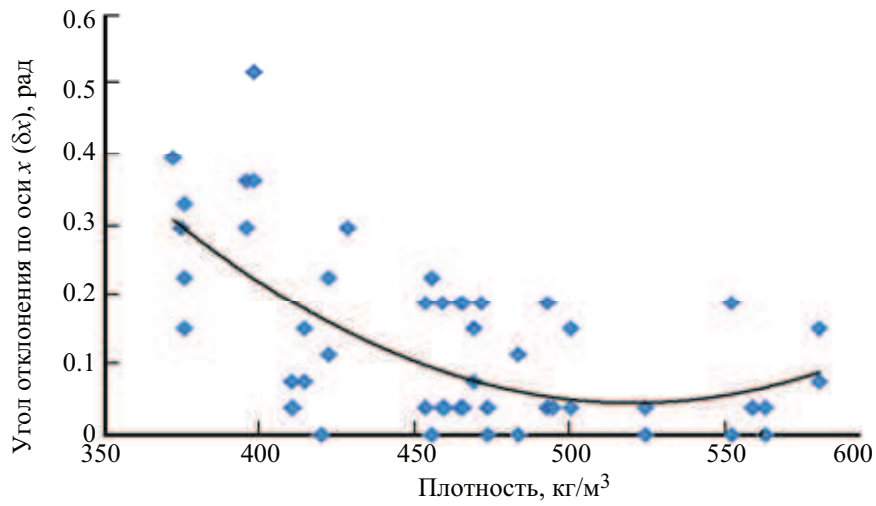
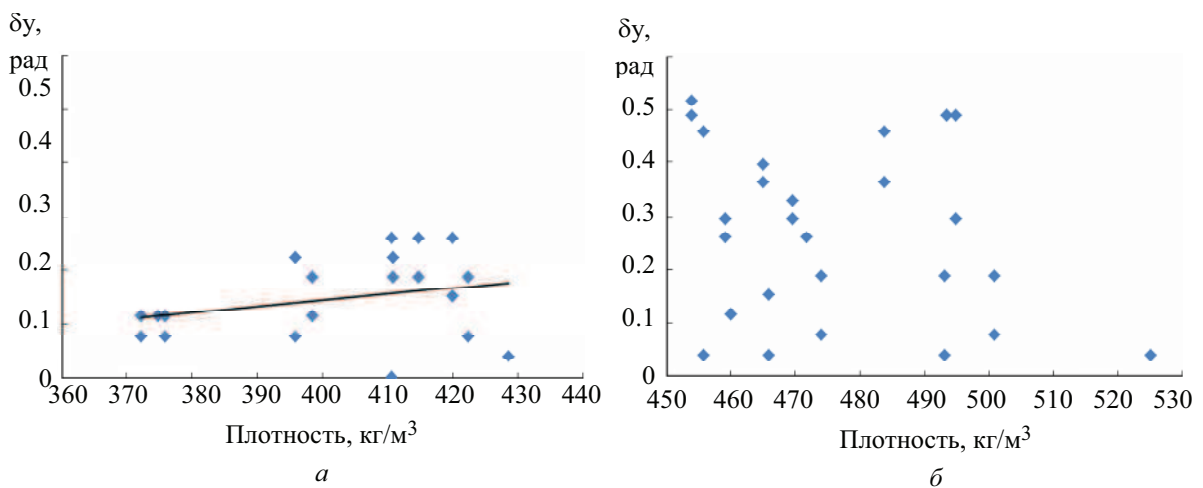
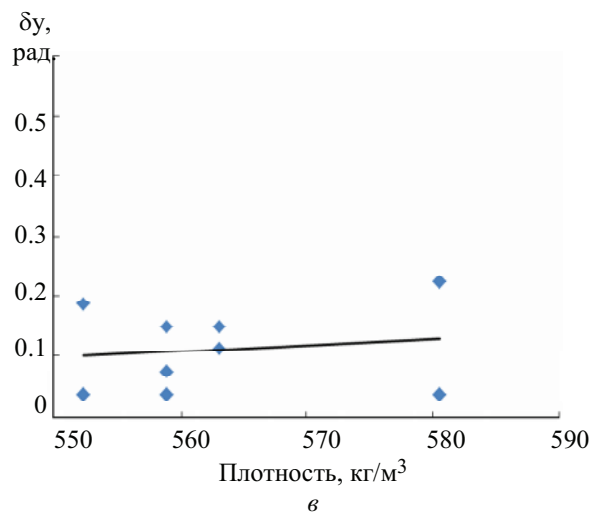


Рис. 5



*a*

*b*



*в*

Рис. 6

Угол отклонения УЗ-пучка вдоль волокон (по оси  $x$ ) связан с макроструктурой древесины и ориентацией клеток, вызванной процессом роста дерева. На рис. 5 приведен график зависимости модуля угла отклонения УЗ-пучка по оси  $x$  от плотности древесины.

Из рис. 5 видно, что с увеличением плотности древесины угол отклонения уменьшается. Однако вследствие того, что в древесных сортаментах невозможно предсказать характер изменения плотности, то и прогнозировать, в какую сторону (положительную или отрицательную) оси  $x$  будет смещаться УЗ-пучок, не представляется возможным. Как показано в [1], ламели с низкой плотностью (менее  $450 \text{ кг/м}^3$ ) нельзя использовать для изготовления клееных конструкций, а при плотностях более  $450 \text{ кг/м}^3$  угол отклонения звукового пучка постоянный и не превышает  $0.2$  рад.

Смещение УЗ-пучка поперек волокон (по оси  $y$ ) обусловлено чередованием более плотной (поздней) и менее плотной (ранней) древесины. На рис. 6 приведен график зависимости угла отклонения УЗ-пучка по оси  $y$  от плотности древесины.

Для малой (ниже  $430 \text{ кг/м}^3$ , рис. 6 *а*) и большой (выше  $520 \text{ кг/м}^3$ , рис. 6, *в*) плотности угол отклонения УЗ-пучка примерно постоянный. Это объясняется более равномерным распределением плотности по толщине образца. Для среднего диапазона плотностей (от  $450$  до  $530 \text{ кг/м}^3$ , рис. 6, *б*) наблюдается большой разброс углов отклонения УЗ-пучка. Для образцов с такой плотностью большой вклад в изменение траектории ультразвукового пучка вносит чередование годичных колец.

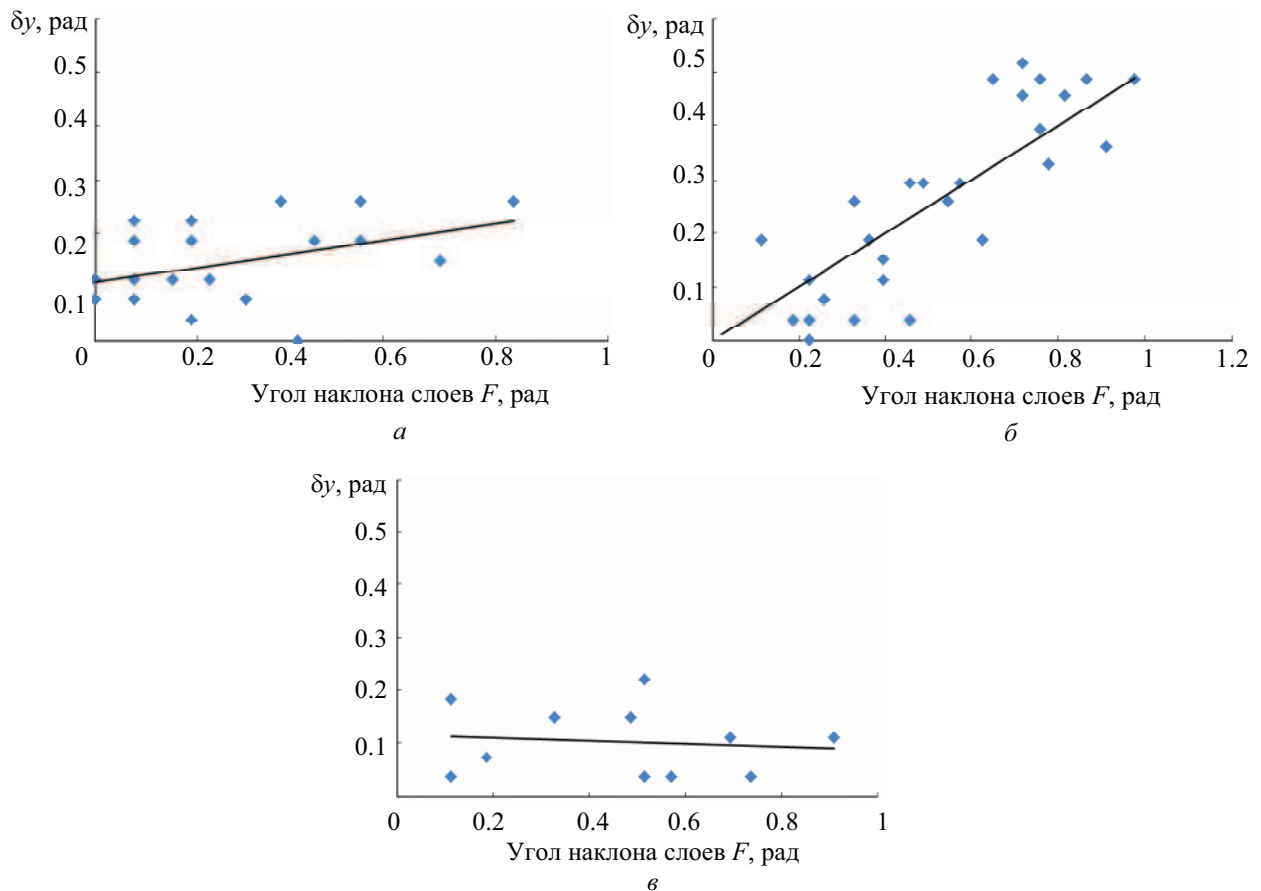


Рис. 7



На рис. 7 показаны результаты измерения угла отклонения УЗ-пучка в зависимости от угла наклона годовых колец для трех диапазонов плотностей.

Видно, что для малых и больших плотностей (рис. 7, а и в) угол наклона годовых колец по отношению к пласти (кромке) не оказывает существенного влияния на изменение траектории УЗ-пучка. Для среднего диапазона плотностей (рис. 7, б) угол отклонения сигнала линейно возрастает с увеличением угла наклона годовых колец и для тангенциальных срезов (рис. 7, б) может достигать 0.5 рад.

Зависимость изменения угла отклонения УЗ-пучка от угла наклона годовых колец можно описать следующим выражением:

$$\delta y = 0.56F - 0.0378.$$

Таким образом, при толщине ламели 26 мм ультразвуковой пучок может отклоняться на 20 мм и более, что при использовании преобразователей с пьезопластиной небольшого диаметра (менее 20 мм) в значительной мере может повлиять на результаты контроля, вплоть до полного отсутствия фиксации прошедшего сигнала.

Подведем итоги:

1. Связь между углом наклона годовых колец, плотностью древесины и отклонением УЗ-пучка позволяет ультразвуковыми методами оценивать структуру древесины и пригодность ее для дальнейшего использования при изготовлении клееных конструкций.

2. Отклонение ультразвука от оси прозвучивания может существенно влиять на достоверность результатов УЗ-контроля клееных конструкций, в частности, на определение координат и размеров дефектов склейки (непроклея) и пороков древесины (смоляных карманов и пустот от выпавших сучков).

3. При невозможности коррекции взаимного положения излучающего и приемного преобразователей их размеры необходимо выбирать максимально большими, чтобы минимизировать ошибку, связанную со смещением УЗ-сигнала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармадонов А. Н. Дефектоскопия древесины. М.: Лесная промышленность, 1987.
2. Лакатош Б. К. Дефектоскопия древесины. М.: Лесная промышленность, 1966.
3. Неразрушающий контроль: Справ.: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. М.: Машиностроение, 2004.
4. Прогнозирование склеивания строганых пиломатериалов методом ультразвуковой диагностики / А. Н. Чубинский, А. А. Федяев, К. С. Паврос, А. В. Теплякова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 7. С. 109–115.

*A. N. Chubinsky, A. A. Fedyaev, K. S. Pavros, A. V. Teplyakova, A. A. Lozak*

#### *INVESTIGATION OF THE DEVIATION OF THE ULTRASONIC BEAM SOUNDING WOOD.*

*Defined the influence of wood density and angle of annual rings on the deviation angle of the ultrasonic (US) beam by using the through transmission method of sounding wood. For achieving most-reliable control of glued structures, the requirements for the size of transducers were formulated.*

**Ultrasonic testing, glued laminated beam, wood gluing, annual rings, wood testing**



УДК 616-71

А. П. Немирко, И. С. Саламонова

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ

*Описан электрический аналог физической модели дыхания при искусственной вентиляции легких. Электрические процессы в модели по форме совпадают со спирометрическими кривыми, получаемыми в аппаратах искусственного дыхания. Предложенная модель помогает объяснить механику искусственного дыхания в норме и при патологиях.*

**Спирограмма, кривая потока, кривая объема, кривая давления**

**Двухкомпонентная физическая модель системы внешнего дыхания.** В литературе по искусственному дыханию, в частности [1], широко используется простая физическая модель дыхания (рис. 1), где  $f$  – объемная скорость потока в дыхательной трубке (поток);  $p$  – давление в трубке;  $r$  – аэродинамическое сопротивление дыхательных путей (резистанс);  $V$  – введенный объем газа;  $c$  – растяжимость, или податливость (комплаенс).

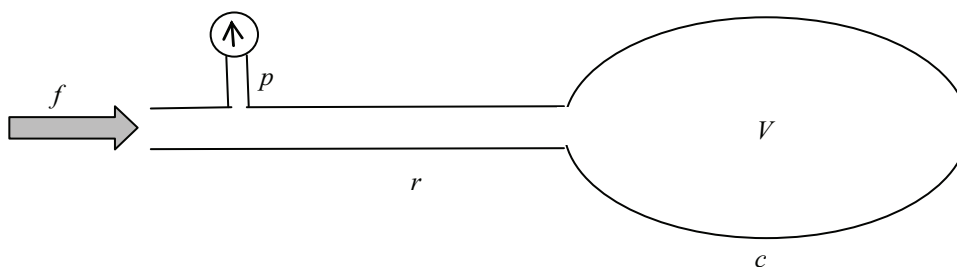


Рис. 1

Модель представляет собой дыхательную трубку, по которой в легкие подается дыхательная смесь, и растяжимую емкость (легкие и грудная клетка), эластическое сопротивление которой нарастает по мере раздувания ее газом. Здесь мы имеем динамическую систему, переходные процессы в которой можно анализировать с позиций теории управления. Один из таких вариантов – построение эквивалентной электрической схемы, которая позволяет использовать математические методы анализа переходных процессов в электрических цепях для анализа рассматриваемой пневматической системы.

Наиболее часто используются два основных режима подачи газовой смеси в легкие: при постоянном давлении  $p$  и при постоянном потоке  $f$ . Рассмотрим электрические аналоги механической модели для каждого режима в отдельности.

**Электрическая модель для режима постоянного потока.** Для электрических моделей сделаем следующую замену механических величин на электрические:  $f \rightarrow I$  (ток);  $p \rightarrow U$  (напряжение);  $r \rightarrow R$  (резистор);  $V \rightarrow Q$  (заряд);  $c \rightarrow C$  (емкость). Тогда электрическую модель аппарата ИВЛ в режиме постоянного потока можно изобразить, как на рис. 2 [2], где  $\Gamma$  – генератор тока;  $I$  – ток;  $\Pi$  – переключатель вдох-выдох, 1 – вдох, 2 – выдох;  $R_{вд}$  – сопротивление при вдохе;  $R_{выд}$  – сопротивление при выдохе;  $C_{ап}$  – емкость, соответствующая растяжимости аппарата;  $C_{л}$  – емкость, соответствующая растяжимости легких.

Электрическая модель для режима постоянного потока. Считаем, что в рассматриваемом случае управления по току (потоку) источник тока генерирует ток некоторой постоянной величины  $A$  в интервале времени от 0 до  $t_{вд}$ , где  $t_{вд}$  – время вдоха. На рис. 2 представлена электрическая схема для этого режима.

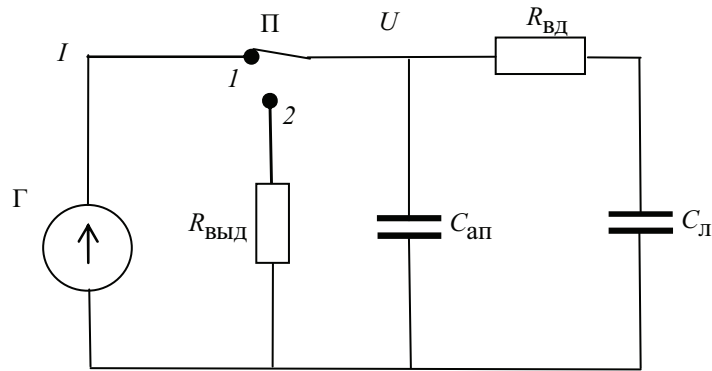


Рис. 2

В первом приближении  $C_{ап}$  можно пренебречь, так как  $C_{ап} \ll C_{л}$ . Напряжение на  $R_{вд}$  обозначим  $U_1$ , а напряжение на  $C_{л}$  –  $U_2$ . Поэтому  $U = U_1 + U_2$ .

*Вдох.* Получим уравнения для напряжения и заряда:

$$I = A, U(t) = U_1(t) + U_2(t) = AR_{вд} + \frac{1}{C_{л}} \int_0^t A dt = AR_{вд} + \frac{1}{C_{л}} At = A \left( R_{вд} + \frac{t}{C_{л}} \right);$$

$$Q(t) = C_{л} U_2(t) = C_{л} \frac{1}{C_{л}} At = At; U_2(\max) = \frac{1}{C_{л}} At_{вд}, Q(\max) = At_{вд}.$$

На рис. 3 представлены кривые:  $a$  – тока,  $b$  – напряжения,  $в$  – заряда при вдохе для данного случая.

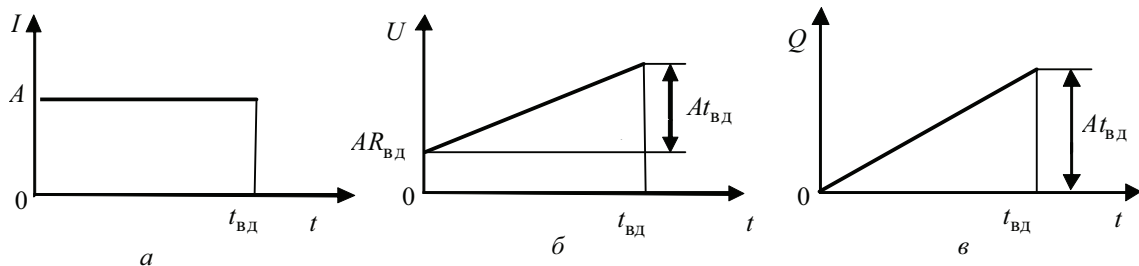


Рис. 3

*Выдох.* В начале выдоха максимальное напряжение на  $C_{\text{Л}}$  равно  $U_2(\text{max}) = \frac{A}{C_{\text{Л}}} t_{\text{ВД}}$ .

Тогда в процессе разряда этой емкости в интервале от  $t_{\text{ВД}}$  до  $T$ , где  $T$  – период дыхания, напряжение  $U_2(t)$  будет меняться следующим образом:

$$U_2(t) = \frac{A}{C_{\text{Л}}} t_{\text{ВД}} e^{-t/\tau}, \quad \tau = (R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}) C_{\text{Л}}.$$

Тогда ток разряда составит

$$I(t) = C_{\text{Л}} \frac{dU_2(t)}{dt} = C_{\text{Л}} \frac{A}{C_{\text{Л}}} t_{\text{ВД}} \left( -\frac{1}{\tau} \right) e^{-t/\tau} = -A t_{\text{ВД}} \frac{1}{(R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}) C_{\text{Л}}} e^{-t/\tau}.$$

На рис. 4 изображена кривая тока в течение вдоха и выдоха, где значение тока

$$I_1(\text{max}) = -\frac{A t_{\text{ВД}}}{(R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}) C_{\text{Л}}}.$$

Получим напряжение на  $R_{\text{ВД}}$

$$U(t) = I(t) R_{\text{ВД}} = \frac{A t_{\text{ВД}}}{(R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}) C_{\text{Л}}} R_{\text{ВЫД}} e^{-t/\tau}$$

или, что то же самое,

$$U(t) = U_2(t) \frac{R_{\text{ВЫД}}}{R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}} = \frac{A}{C_{\text{Л}}} t_{\text{ВД}} \frac{R_{\text{ВЫД}}}{R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}} e^{-t/\tau}.$$

При  $t = 0$  напряжение

$$U(t) = \frac{A t_{\text{ВД}}}{C_{\text{Л}}} \frac{R_{\text{ВЫД}}}{R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}} = U_2(\text{max}) \frac{R_{\text{ВЫД}}}{R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}}.$$

Разность напряжений  $U$  в конце вдоха и начале выдоха

$$\Delta U = U_2(\text{max}) - U_2(\text{max}) \frac{R_{\text{ВЫД}}}{R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}} = U_2(\text{max}) \frac{R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}} - R_{\text{ВЫД}}}{R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}} = U_2(\text{max}) \frac{R_{\text{ВД}}}{R_{\text{ВД}} + R_{\text{ВЫД}}}.$$

Таким образом, получаем график, представленный на рис. 5, а.

Уравнение заряда (объема)  $Q$  приведено ниже:

$$Q(t) = U_2(t) C_{\text{Л}} = \frac{A}{C_{\text{Л}}} C_{\text{Л}} t_{\text{ВД}} e^{-t/\tau}, \quad Q(t) = A t_{\text{ВД}} \quad t = 0.$$

На рис. 5, б отобразен график изменения объема во время вдоха и выдоха.

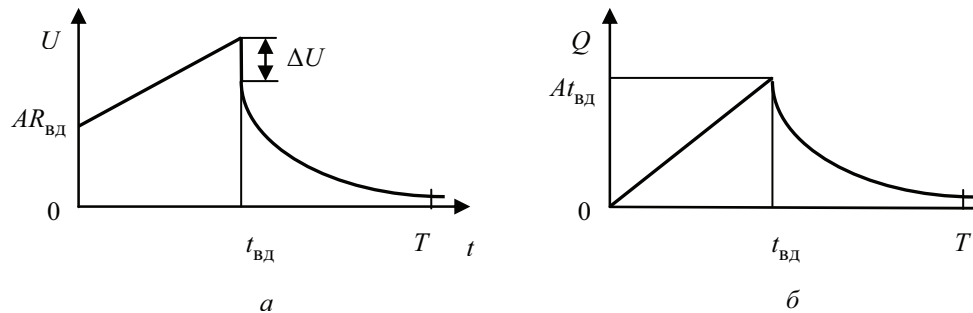


Рис. 5

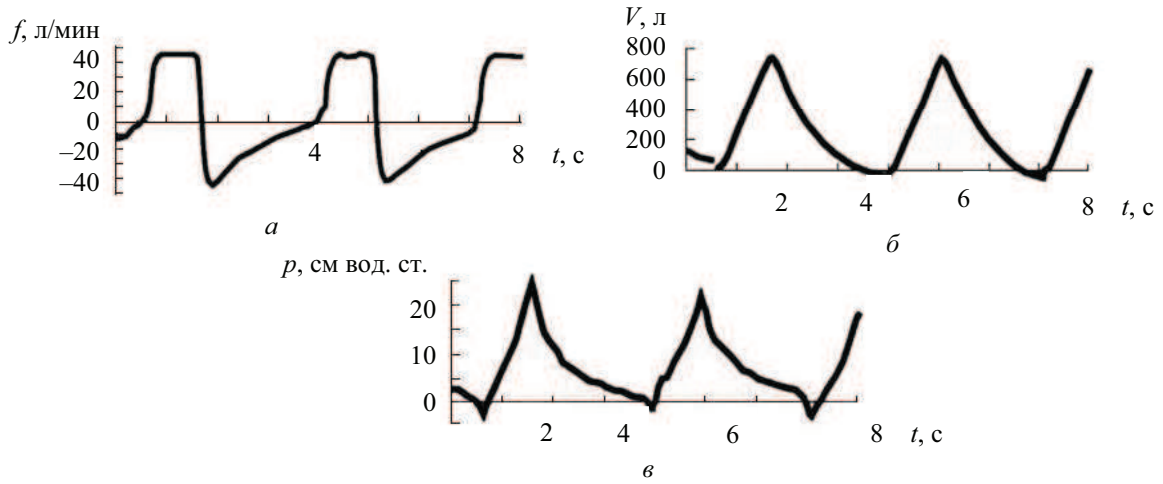


Рис. 6

На рис. 6 приведены реальные кривые для управления по току: *а* – поток, *б* – объем, *в* – давление.

**Электрическая модель для режима постоянного давления.** Теперь рассмотрим режим постоянного напряжения (давления). На рис. 7 представлена электрическая схема для этого режима.

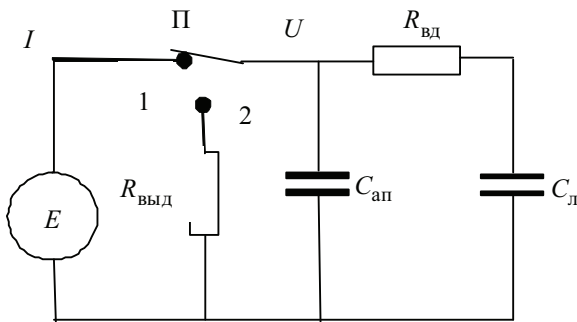


Рис. 7

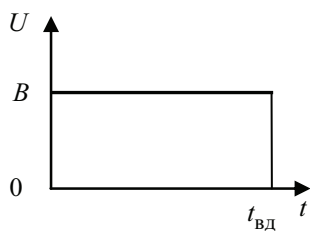
Так же, как и раньше, напряжение на  $R_{вд}$  обозначим  $U_1$ , а напряжение на  $C_{л}$  –  $U_2$ .

*Вдох.* При вдохе получаем следующие уравнения для тока, напряжения и заряда:

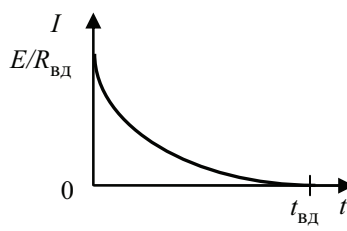
$$I(t) = \frac{E}{R_{вд}} (1 - e^{-t/\tau_1}), \quad \tau_1 = R_{вд} C_{л};$$

$$Q(t) = U_2(t) C_{л}, \quad U_2(t) = E (1 - e^{-t/(R_{вд} C_{л})});$$

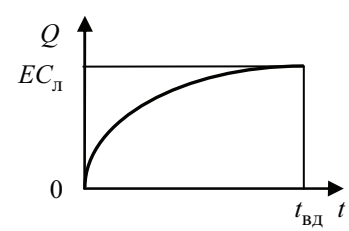
$$Q(t) = C_{л} E (1 - e^{-t/(R_{вд} C_{л})}).$$



*а*



*б*



*в*

Рис. 8

Рисунок 8, *а* отображает полученное уравнение для напряжения, рис. 8, *б* – тока и рис. 8, *в* – заряда.

*Пауза между вдохом и выдохом.* Определим переходной процесс в паузе между вдохом и выдохом. Для этого воспользуемся схемой, приведенной на рис. 9. Напряжение на  $C_{ап}$  в конце вдоха обозначим  $E$ , а напряжение на  $C_{л}$  –  $U_2(\max)$ .

Предполагается, что  $U_2(\max) < E$ , т. е. емкость  $C_{\text{л}}$  в конце вдоха заряжена не до конца. Если они равны, то в паузе ничего не случится. Так как  $q_1 + q_2 = \text{const}$ , то

$$C_{\text{ап}}E + C_{\text{л}}U_2(\max) = C_{\text{ап}}U_x + C_{\text{л}}U_x = U_x(C_{\text{ап}} + C_{\text{л}}).$$

Таким образом, после окончания переходного процесса получим установившееся напряжение на обеих емкостях:

$$U_x = \frac{C_{\text{ап}}E + C_{\text{л}}U_2(\max)}{C_{\text{ап}} + C_{\text{л}}}.$$

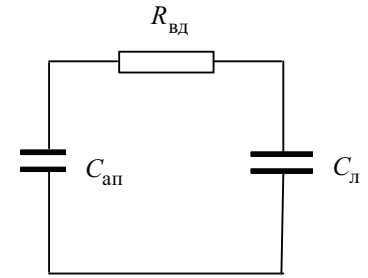


Рис. 9

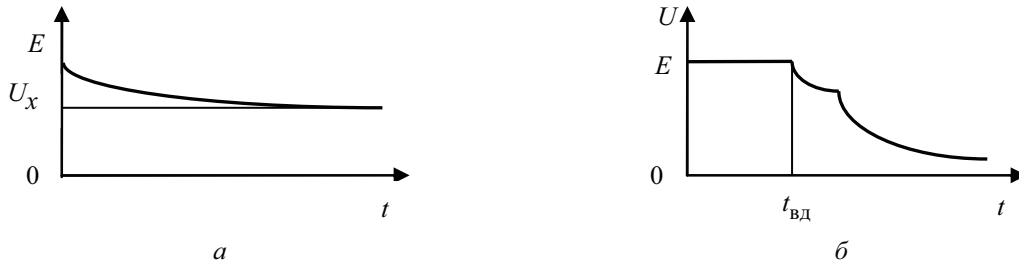


Рис. 10

На рис. 10, а представлен график изменения  $U$  во время паузы.

$$U(t) = (E - U_x)e^{-t/\tau_2}, \quad \tau_2 = R_{\text{вд}} \frac{C_{\text{ап}}C_{\text{л}}}{C_{\text{ап}} + C_{\text{л}}}.$$

*Выдох.* После переключения на выдох напряжение  $U$  будет равно:

$$U(t) = U_x e^{-t/\tau}, \quad \tau = (R_{\text{вд}} + R_{\text{выд}})C_{\text{л}}.$$

Считаем, что  $C_{\text{ап}} \ll C_{\text{л}}$ , поэтому в  $\tau$  оно не учитывается. Вся кривая  $U$  будет иметь вид, представленный на рис. 10, б.

Если не учитывать влияния паузы и пренебречь  $C_{\text{ап}}$ , то можно получить уравнение для тока (потока):

$$I(t) = C_{\text{л}} \frac{dU_2(t)}{dt}, \quad U_2(t) = Ee^{-t/\tau}, \quad \tau = (R_{\text{вд}} + R_{\text{выд}})C_{\text{л}};$$

$$I(t) = -\frac{1}{\tau} Ee^{-t/\tau}.$$

Для заряда (объема) получим уравнение

$$Q(t) = C_{\text{л}}U_2(t) = C_{\text{л}}Ee^{-t/\tau}$$

На рис. 11 представлены кривые: а – напряжения; б – тока; в – заряда, получаемые с помощью данных уравнений, а на рис. 12 – реальные спирограммы: а – потока, б – объема, в – давления.

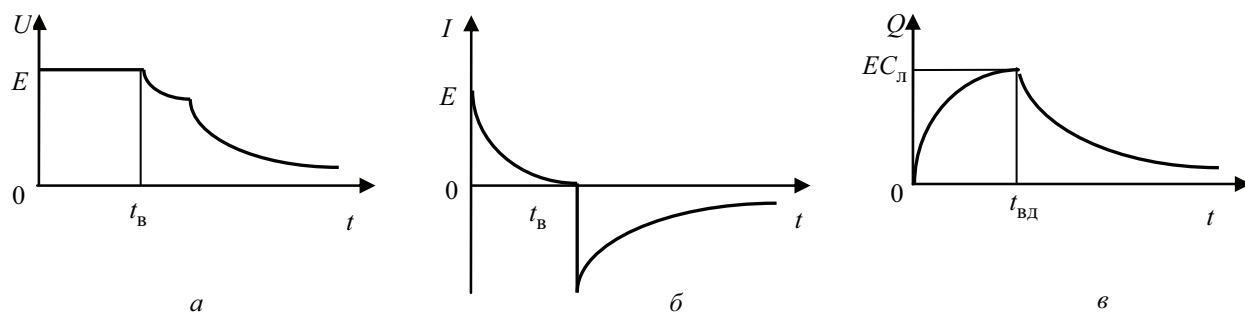


Рис. 11

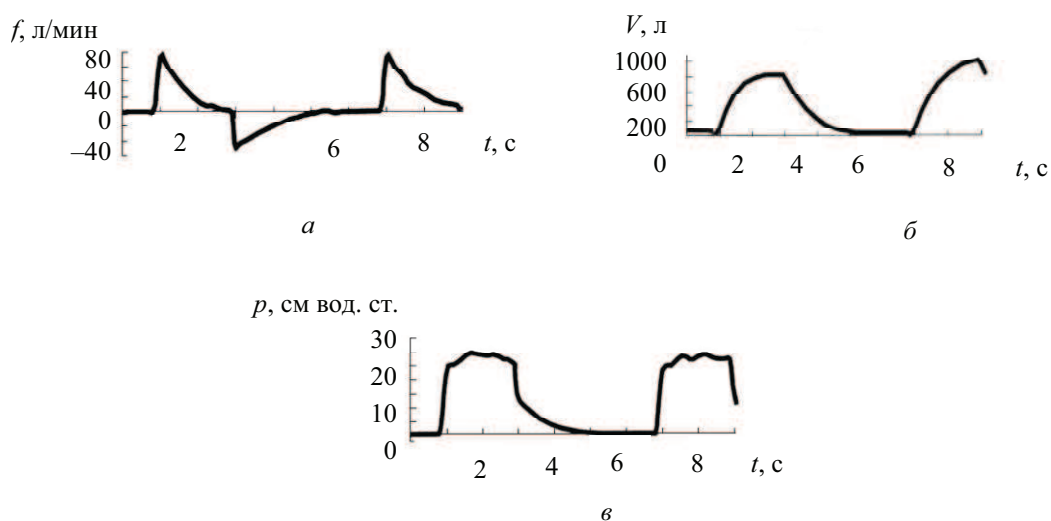


Рис. 12

Таким образом, можно сделать вывод, что полученные изображения соответствуют реальным кривым. Предложенная модель помогает объяснить механику искусственного дыхания в норме и при патологиях и найти новые подходы к измерению параметров спирограмм.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки (госконтракт от 10.10.11 г. № 6.522.12.2016).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебединский К. М., Мазурок В. А., Нефедов А. В. Основы респираторной поддержки. СПб.: Человек, 2008. 208 с.
2. Бурлаков Р. И., Гальперин Ю. Ш., Юревич В. М. Искусственная вентиляция легких (принципы, методы, аппаратура). М.: Медицина, 1986. 240 с.

*A. P. Nemirko, I. S. Salamonova*

#### *ELECTRICAL MODEL OF SYSTEM OF EXTERNAL BREATH DURING MECHANICAL VENTILATION OF LUNG*

*An electrical analog of a physical model of breath during mechanical ventilation of lung is described. Electrical processes in the model match the form with spirometric curves obtained in the apparatus of mechanical respiration. The proposed model helps to explain the mechanics of mechanical respiration in normal and pathological conditions.*

**Spirogram, flow waveform, pressure waveform, volume waveform**

## АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ЭКГ С ВРЕМЕННОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ. ОБЩИЙ АНАЛИЗ

*Предложены, исследованы и приведены результаты моделирования алгоритмов измерения в реальном масштабе времени электрокардиосигналов (ЭКС) в условиях воздействия помех. Проведен анализ измерительного алгоритма с целью обеспечения наилучшего соотношения между результатами измерения ЭКС и воздействующими на него помехами.*

**Электрокардиосигналы, синтез алгоритмов, дискретные операторы, измерение, фильтрация помех**

Разработанными стандартами установлены определенные параметры для электрокардиографов. К этим параметрам, помимо, например, числа отведений, в первую очередь относятся ограничения на частотную полосу пропускания измерительных каналов и частоту временной дискретизации. Эти два важнейших параметра были введены в период, когда микроэлектронная элементная база не достигла тех возможностей, которые она имеет сейчас. В связи с данным обстоятельством в последнее время появился интерес к так называемым ЭКГ повышенного разрешения, название которых обусловлено расширением частотной полосы пропускания в область верхней частоты до 2 кГц. Однако интерес может представлять не только столь существенное расширение частотной полосы пропускания, а и увеличение частоты дискретизации при умеренном расширении упомянутой частотной полосы, например до 250 Гц. Дело в том, что даже при умеренном расширении полосы частот усугубляется проблема фильтрации ЭКС при традиционной методике выбора частоты временной дискретизации, каковой определяется известной теоремой отсчетов. Если строго следовать данной теореме, то достигается так называемая максимальная декорреляция между дискретными значениями ЭКС, что снижает эффективность цифровой фильтрации сигнала. Повышение эффективности цифровой фильтрации можно обеспечить за счет применения специальных алгоритмов при увеличении частоты временной дискретизации. Благодаря этому существенно снижаются требования к аналоговым способам борьбы с помехами, в частности, можно отказаться от применения режекторных фильтров. К главным недостаткам аналоговых методов фильтрации относится то, что они приводят к неконтролируемым искажениям реального сигнала. Кроме того, аналоговая фильтрация вносит определенную схемотехническую избыточность, так как при возрастающей производительности микроконтроллеров и улучшении метрологических характеристик АЦП увеличиваются возможности программно-цифрового выполнения всех вспомогательных операций, к которым относится и фильтрация. В настоящее время разработаны ряд методов и алгоритмов борьбы с помехами, которые могут быть реализованы программно [1]. К таким методам можно отнести, например, оптимальную и адаптивную фильтрации. Однако эти методы не отличаются простотой программной реализации и требуют выполнения достаточно трудоемких вспомогательных операций и определенных схемотехнических дополнений к основной схеме ЭКГ в виде, допустим, вспомогательного канала или отведения. Поэтому представляют интерес цифровые усредняющие алгоритмы на основе повышенной частоты временной дискретизации.



**Постановка задачи.** Пренебрегая мультипликативной составляющей помехи, рассмотрим общепринятую модель ЭКС при воздействии аддитивной помехи в следующем виде:

$$y(n\tau) = x(n\tau) + g(n\tau) + \xi(n\tau), n = 0, 1, 2 \dots,$$

где  $y(n\tau)$  – дискретные значения сигнала на выходе АЦП;  $x(n\tau)$  – реальный ЭКС;  $g(n\tau)$  – сетевая помеха;  $\xi(n\tau)$  – широкополосный шум или помеха общего вида;  $\tau$  – интервал дискретизации исходного или входного сигнала  $y(t)$ .

Основной задачей при измерении ЭКС является получение полезного сигнала  $x(n\tau)$  с минимальной или заданной погрешностью. В условиях воздействия помех эта задача традиционно решается за счет предварительной фильтрации, назначение которой в идеале заключается в том, чтобы избавиться от помех без искажения полезного сигнала  $x(n\tau)$ . Однако алгоритм фильтрации, представленный некоторым оператором  $H$ , воздействуя на входной сигнал  $y(n\tau)$ , тем самым действует на все его составляющие, включая и реальный ЭКС. Вследствие этого получаем выходной сигнал  $\eta(n\tau) = H\{y(n\tau)\}$ , который не совпадает с реальным полезным сигналом  $x(n\tau)$ . Поиск оператора фильтрации, при котором достигался бы эффект минимального искажения сигнала  $x(n\tau)$ , при максимальном подавлении суммарной помехи затрудняется из-за противоречивости сформулированного требования. В связи с этим необходимо подобрать такой оператор  $H$ , для которого выполнялось бы условие

$$L = \inf_H K \{x(n\tau), \eta(n\tau)\}, \quad (1)$$

где  $K\{\dots\}$  – некоторый критерий, определяющий меру расхождения между указанными в скобках функциями.

Поиск оператора  $H$ , при котором достигалась бы нижняя грань критерия (1) при минимальном объеме априорных данных о характеристиках помех и наименьшем искажении полезного сигнала является довольно сложной задачей. Решению этой задачи посвящено большое число работ (в частности, [1]). Отметим, что если подходить к решению задачи с точки зрения измерения ЭКС, то условие (1) преобразуется к виду

$$K\{x(n\tau), \eta(n\tau)\} \leq \delta_0, \quad (2)$$

где  $\delta_0$  – заданная величина характеристики погрешности (максимальная величина либо средний квадрат и т. п.) в зависимости от используемого критерия  $K$ .

Оценка погрешности осуществляется в виде систематической и случайной составляющих. Напомним, что для оценки систематической составляющей используется оператор определения математического ожидания (МО), а для оценки случайной составляющей определяется МО от квадрата центрированной величины, т. е. дисперсия. Средний квадрат объединяет обе составляющие погрешности. Требование (2) к измерению ЭКС оказывается достаточно жестким, так как по существу информация о полезном сигнале  $x(n\tau)$  отсутствует. В этом случае обычно не говорят об измерении ЭКС, так как в противном случае необходимо устанавливать погрешность измерения, что сделать затруднительно из-за отсутствия образцового сигнала. Поэтому в основном говорят об оценке ЭКС либо о снятии, регистрации или получении электрокардиограммы. Для того чтобы разобраться в причинах расхождения терминов при получении электрокардиограммы электронными средствами, заметим, что обычно из всевозможных операторов в качестве  $H$ , удовлетворяющих условию (1), на практике выбирается класс операторов, обладающих свойством

$$\eta(n\tau) = H\{x(n\tau)\} + H\{g(n\tau)\} + H\{\xi(n\tau)\}, \quad (3)$$

т. е. свойством линейности.

Равенство (3) позволяет несколько видоизменить требования (1) и (2) и свести их к виду

$$\eta(n\tau) = \begin{cases} H\{x(n\tau)\} = \hat{x}(n\tau), & \rho[\hat{x}(n\tau) - x(n\tau)] \leq \varepsilon_0, & x(n\tau); \\ \Theta\{H\{g(n\tau)\}\} = \min, & g(n\tau); \\ \Theta\{H\{\xi(n\tau)\}\} = \min, & \xi(n\tau), \end{cases} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

где  $\rho[ \dots ]$  и  $\varepsilon_0$  – функция меры, характеризующая отклонение оценки ЭКС  $\hat{x}(n\tau)$  от его действительного значения, и ее заданная или допустимая величина;  $\Theta\{ \dots \}$  – некоторый априори задаваемый критерий, в смысле которого осуществляется поиск минимума при воздействии оператором  $H$  на соответствующую составляющую сигнала  $\eta(n\tau)$ .

Очевидно, что найти или синтезировать оператор (3) со свойством (4) прямыми вычислениями затруднительно, так как решение задачи (1) сводится к выполнению оператором  $H$  противоречивых требований (4). Истинное значение сигнала неизвестно и проверка первого условия в (4), даже экспериментально, может быть осуществлена только косвенно или по специально синтезированному образцовому сигналу, в определенном смысле близкому к реальному ЭКС. Учитывая противоречивость требований (4), представляет интерес метод решения данной задачи, основанный на синтезе композиционного оператора в виде

$$\eta(n\tau) = H_1\{H_2\{x(n\tau)\}\} + H_1\{H_2\{g(n\tau)\}\} + H_1\{H_2\{\xi(n\tau)\}\}. \quad (5)$$

В (5) необходимо так выбрать операторы  $H_1$  и  $H_2$ , чтобы они удовлетворяли требованию (1) и, как следствие, (4). Для того чтобы при свойстве линейности (3) реализовать в (4) первое условие, достаточно, например, чтобы оператор  $H_1$  был бы оператором интегрирования, а  $H_2$  – дифференцирования или чтобы эти операторы в определенном смысле были бы близки к ним. Причем параметры этих операторов должны быть синтезированы таким образом, чтобы в (4) для них удовлетворялись бы остальные два условия. Для решения этой задачи в дискретном варианте, т. е. когда получают значения ЭКС в дискретные моменты времени, кратные временному интервалу  $\tau$ , рассмотрим предварительно дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d\eta(t)}{dt} = F[x(t), g(t), \xi(t)]. \quad (6)$$

Не уточняя пока конкретный вид преобразования  $F[ \dots ]$ , представим (6) в эквивалентной форме:

$$dy(t) = F[x(t), g(t), \xi(t)]dt. \quad (7)$$

Для перехода к дискретному варианту представления (7) проинтегрируем правую и левую части уравнения (7) в пределах от  $n\tau$  до  $(n+1)\tau$ , в результате чего получим

$$\int_{n\tau}^{\tau(n+1)} dy(t) = \int_{n\tau}^{\tau(n+1)} F[x(t), g(t), \xi(t)]dt.$$

Зафиксировав для преобразования  $F[ \dots ]$  момент времени  $t = n\tau$ , приходим к итерационному алгоритму

$$y[(n+1)\tau] = y(n\tau) + \tau F[x(n\tau), g(n\tau), \xi(n\tau)]. \quad (8)$$

Положив  $y(0) = 0$  и выполняя итерации в (8), получим

$$y[(n+1)\tau] = \tau \sum_{k=0}^n F[x(k\tau), g(k\tau), \xi(k\tau)]. \quad (9)$$

Сравнивая (9) с (3) и (5), нетрудно убедиться в том, что правая часть (9) будет удовлетворять свойству линейности оператора  $H$  относительно всех составляющих входного сигнала, если преобразование  $F[ \dots ]$  также будет обладать свойством линейности. Итак, решение поставленной задачи синтеза сводится к выбору преобразования  $F[ \dots ]$ , определяющего оператор  $H_2$ . Так как первый оператор в (9) представляет собой оператор суммирования, который является в определенном смысле аппроксимацией оператора интегрирования, то преобразование  $F[ \dots ]$  с учетом (5) должно по крайней мере аппроксимировать оператор дифференцирования через конечные разности. Причем поиск соответствующей аппроксимации оператора дифференцирования должен исходить из выполнения условия (4). Аппроксимация оператора дифференцирования через конечные разности должна быть в определенном смысле оптимизирована. Для этого обратимся к работе [2], в которой предлагается метод оптимизации данного оператора на основе минимума среднего квадрата для функции, заданной в дискретных отсчетах. Модифицируя рассмотренную в работе [2] аппроксимацию оператора дифференцирования функции, заданную в виде последовательности отсчетов, через конечные разности при использовании  $m$  соседних точек с обеих сторон относительно точки дифференцирования  $k$ , представим искомое преобразование  $F[ \dots ]$  в виде

$$F[x(k\tau), g(k\tau), \xi(k\tau)] = \frac{\sum_{i=-m}^m i [x(k\tau + iT) + g(k\tau + iT) + \xi(k\tau + iT)]}{2 \sum_{i=0}^m i^2 T}, \quad (10)$$

где  $T$  – временной параметр, характеризующий величину временного отклонения в операторе  $F[ \dots ]$  отсчетов сигнала  $y(n\tau)$  от точки дифференцирования.

Свойство линейности оператора суммирования в (10) при анализе позволяет применить его в отдельности к каждому из слагаемых и тем самым обеспечить выполнение условия (4). Сам оператор  $F[ \dots ]$  зависит от параметров  $\tau$ ,  $m$  и  $T$ . В общем случае параметр  $T = p\tau$ , т. е. устанавливается кратным интервалу дискретизации  $\tau$ . При  $m = 1, 2, 3, \dots$  и  $T = \tau$ , т. е. для  $p = 1$  оператор  $F[ \dots ]$  совпадает с аппроксимацией оператора дифференцирования, рассмотренного в [2]. Для дальнейшего анализа, включая теоретическую оценку систематической и случайной составляющих погрешности, необходимо установить адекватные модели всех трех составляющих сигнала  $y(n\tau)$ , входящих в выражение (2). Прежде всего, рассмотрим сам ЭКС  $x(n\tau)$ . Этот специфический сигнал и может быть охарактеризован как квазидетерминированный сигнал, поскольку у него можно различить ярко выраженные по установленным признакам детерминированные фрагменты, характеристики и параметры которых, однако, непредсказуемо изменяются в достаточно широких пределах. Например, представляющая интерес для восстанов-

ления сигнала его первая производная от фрагмента к фрагменту претерпевает значительные изменения, что затрудняет однозначный выбор операторов  $H_1$  и  $H_2$  для выполнения требований (4) одновременно для всех составляющих исходного сигнала.

Модели остальных составляющих сигнала  $y(n\tau)$  в (3) определить проще, так как для этого имеется больше априорной информации. Так, составляющая  $g(n\tau)$  представляет собой сумму гармонического сигнала с частотой 50 Гц и кратных ей по частоте гармоник. При этом их амплитуды изменяются случайно. Последнюю составляющую сигнала в (3), как показывает практика, в общем случае можно представить моделью случайного нестационарного процесса. Однако на ограниченном временном интервале, существенно меньшем RR-интервала ЭКС, помеху можно рассматривать в виде случайного квазистационарного процесса. В этом случае исходную модель нестационарного процесса с достаточно высокой достоверностью можно сузить до модели случайного квазистационарного эргодического процесса. Так как физическая природа порождения каждой из составляющих сигнала  $y(n\tau)$  различна, то можно рассматривать эти составляющие статистически независимо. Условие независимости позволяет анализировать характеристики погрешности для каждой составляющей сигнала отдельно с последующим обоснованием установленных результирующих значений параметровооператора (10) при минимизации критерия (1), (2) или (4). Положительным фактором при анализе первой и третьей составляющей сигнала  $y(n\tau)$  является то, что полоса частот у них общая, а для второй составляющей априорно известен ее вид, представляющего собой сумму гармоник с известными частотами, кратными 50 Гц.

Опираясь на приведенную априорную информацию о моделях составляющих сигнала  $y(n\tau)$ , перейдем непосредственно к анализу каждой из них. Конечной целью анализа является поиск таких значений параметров  $\tau$ ,  $m$  и  $p(T = p\tau)$  в (10), которые удовлетворяли бы в худшем случае приемлемому компромиссу при выполнении условия (4), а в лучшем случае – требованию (2). В сформулированном виде задача оценки или измерения ЭКС в условиях воздействия помех сводится к оптимальному в указанном смысле выбору параметров  $\tau$ ,  $m$  и  $p$  из ограниченного допустимого пространства их изменений, например в форме параллелепипеда. Конкретный выбор значений этих параметров, с одной стороны связан с оптимальным схемотехническим проектированием электрокардиографов, включая их современную аналого-цифровую реализацию на базе микроконтроллеров. С другой стороны, совместно с установленными операторами  $H_1$  и  $H_2$  данные параметры влияют на формирование программного обеспечения этих микроконтроллеров.

На основе (10) и установленных математических моделей составляющих сигналов  $y(n\tau)$  рассмотрим применение в качестве критерия  $\Theta\{ \dots \}$  МО и дисперсию в виде

$$M\{\eta(n\tau)\} = M\{H_1\{H_2\{x(n\tau)\}\}\} + M\{H_1\{H_2\{g(n\tau)\}\}\} + M\{H_1\{H_2\{\xi(n\tau)\}\}\} \quad (11)$$

и

$$D\{\eta(n\tau)\} = D\{H_1\{H_2\{x(n\tau)\}\}\} + D\{H_1\{H_2\{g(n\tau)\}\}\} + D\{H_1\{H_2\{\xi(n\tau)\}\}\}, \quad (12)$$

где  $M\{ \dots \}$  и  $D\{ \dots \}$  – операторы определения МО и дисперсии по составляющим сигнала  $g(n\tau)$  и  $\xi(n\tau)$  соответственно.

Для определения первого слагаемого в (11) применим к нему преобразование (10), которое в  $k\tau$ -й момент времени после разложения в этой точке в ряд Тейлора сигнала  $x(k\tau)$ , представляем в виде

$$H_2 \{x(k\tau)\} \approx \frac{\sum_{i=-m}^m i \left[ x(k\tau) + \frac{x'(k\tau)iT}{1!} + \frac{x''(k\tau)(iT)^2}{2!} + \frac{x'''(k\tau)(iT)^3}{3!} \right]}{2 \sum_{i=0}^m i^2 T}.$$

Так как  $\sum_{i=-m}^m ix(k\tau) = 0$  и  $\sum_{i=-m}^m i \frac{x''(k\tau)(iT)^2}{2!} = 0$ , где  $x'(k\tau), x''(k\tau), x'''(k\tau)$  – первая, вторая и третья производные ЭКС для указанных значений аргумента, то

$$H_2 \{x(k\tau)\} \approx x'(k\tau) + \frac{x'''(k\tau)T^2}{3!} \frac{\sum_{i=0}^m i^4}{\sum_{i=0}^m i^2}.$$

Поэтому для оценки первого слагаемого в (4) с учетом (10), (11) и того факта, что оператор МО берется по случайным величинам, сформированным вторым и третьем слагаемыми исходного сигнала, имеем

$$\hat{x}[(n\tau)] = M \{H \{x(n\tau)\}\} = \sum_{k=0}^n x'(k\tau)\tau + \frac{T^2 \sum_{i=0}^m i^4}{3! \sum_{i=0}^m i^2} \sum_{k=0}^n x'''(k\tau)\tau, \quad (13)$$

где  $H \{x(n\tau)\} = H_1 \{H_2 \{x(n\tau)\}\}$ .

При достаточно малом  $\tau$  и выполнении очевидного равенства

$$\frac{\sum_{i=0}^m i^4}{\sum_{i=0}^m i^2} = \frac{3m(m+1)-1}{5}$$

формула (13) преобразуется к виду

$$\hat{x}[(n)\tau] \approx \sum_{k=0}^n x'(k\tau)\tau + \frac{(3m(m+1)-1)(p\tau)^2}{30} x''(n\tau). \quad (14)$$

Первое слагаемое в (14) определяет методическую погрешность аппроксимации вида

$$\varepsilon_{01} = (\tau) = x(n\tau) - \sum_{k=0}^n x'(k\tau)\tau,$$

которая стремится к нулю только тогда, когда выполняется предел

$$x(n\tau) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \sum_{k=0}^n x'(k\tau)\tau.$$

Второе слагаемое в (14) определяет вторую составляющую погрешности  $\varepsilon_0$  в виде

$$\varepsilon_{02} = \frac{(3m(m+1)-1)(p\tau)^2}{30} \max_{n\tau} x''(n\tau). \quad (15)$$

Из (15) следует, что при фиксированных параметрах  $m$ ,  $p$  и  $\tau$  допустимая величина методической погрешности зависит в основном от максимума второй производной ЭКС, который достигается в экстремальных точках ЭКС, т. е. для R-зубца. Для выбора величины  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}$ , а также параметров  $m$ ,  $p$  и  $\tau$  необходимо руководствоваться в первую очередь допустимой величиной искажения R-зубца ЭКС. Но этого недостаточно, так как в соответствии с (11) допустимая погрешность измерения ЭКС, а вернее, ее оценка, зависит от составляющих входного сигнала, которые определяются остальными слагаемыми в формулах (11) и (12). Дальнейший анализ этих составляющих погрешности будет проведен в следующем номере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход. / Пер. с англ. под ред. А. П. Немирко. М. физматлит. 2007. 440 с., ил.
2. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. Справочное руководство/ Пер. с англ. М. З. Кайнера под ред. А. М. Лопшица. М.: Физматлит. 1961. 524 с., ил.

*E. P. Tikhonov*

*FILTER ALGORITHM ECG WITH TIME DISCRETIZATION IN HIGH-RESOLUTION.  
GENERAL ANALYSIS*

*The article suggested and studied the results of the simulation measurement algorithms in real-time ECG in the conditions of the impact of interference. The analysis of the measurement algorithm in order to provide the best balance between the results of measurement of the ECG and interference.*

**The ECG, the synthesis of algorithms, discrete operators, measurement, noise filtering**



УДК 159.99

М. А. Антропова, К. Р. Червинская

## **АНАЛИЗ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ЧЕЛОВЕКОКОМПЬЮТЕРНОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ В РОССИЙСКИХ ОРГАНИЗАЦИЯХ**

*Проводится исследование трудовой деятельности специалистов по человекокомпьютерному взаимодействию в российских организациях. Обозначены теоретико-психологические и методологические основания анализа деятельности специалистов по инжинирингу информационных моделей. На основе методологии Ю. Энгельстема проведено исследование, позволившее составить обобщенную схему деятельности специалистов данного профиля. Были получены описания процессов, в которых они участвуют, обобщенная декомпозиция этих процессов на субъекты, объекты, инструменты, правила, включенных в процесс сотрудников и структурные подразделения. Выделены три типа результатов рабочих процессов: материальный результат, разделенное понимание и действие.*

### **Человекокомпьютерное взаимодействие, анализ деятельности, разделение знаний**

В сфере разработки программного обеспечения все чаще можно услышать слова usability-специалист, UI (User Interface)-специалист и пр., которые подразумевают целый спектр профессий, обеспечивающих качество интерфейса. В России традиционно подобные проблемы исследуются в рамках эргономики и инженерной психологии. В зарубежных работах дисциплина, занимающаяся оптимизацией человекокомпьютерного взаимодействия (ЧКВ), называется когнитивной эргономикой, а разрабатываемые компьютерные системы – когнитивными техническими системами [1]. Так как в России нет единого названия для всех специалистов данного профиля, далее в этой статье они будут именоваться специалистами по ЧКВ.

С формированием в России рынка создания веб-сайтов и программного обеспечения остро встает проблема участия специалиста по ЧКВ в разработке и оценке подобных продуктов. Современные образовательные стандарты в сфере эргономики были во многом унаследованы от СССР и нацелены в основном на подготовку эргономистов в сфере создания человекомашиных систем. Сейчас же коммерческие организации озаботились не только подбором в штат квалифицированных программистов, но и поиском специалистов по юзабилити. Профессионального обучения по направлениям «Когнитивная эргономика» и «Человекокомпьютерное взаимодействие» в России не осуществляется, есть только ряд близких образовательных программ, включающих некоторые курсы по эргономике, ин-

женерной психологии, иногда юзабилити в различных вузах. Поэтому многие специалисты приходят в профессиональную область не после студенческой скамьи, а после нескольких лет трудовой деятельности в другой области, например, в программировании или сфере дизайна. Соответственно, и данная область деятельности осуществляется представителями самых разных профессиональных сфер.

Таким образом, актуальность данного исследования обусловлена, с одной стороны, отсутствием специального профессионального образования в данной сфере, с другой – высоким спросом на рынке труда специалистов по проектированию информационных моделей. Анализ деятельности специалистов такого рода позволит вплотную подойти к созданию учебных курсов по когнитивной эргономике.

Можно выделить следующие цели исследования:

1. Изучить социодемографический портрет специалистов по ЧКВ в российских организациях.

2. Описать деятельность специалистов по ЧКВ в российских организациях.

Сбор данных проводился на интернет-ресурсе [www.moikrug.ru](http://www.moikrug.ru), на котором специалисты выкладывают свои «профили» с описанием мест работы, указывают профессиональные обязанности, возраст, образование.

**Портрет представителей профессиональной области.** Поиск специалистов производился по ключевым словам: usability, юзабилити, проектирование интерфейсов, user interface, user experience, GUI. Были отобраны только профили, содержащие наиболее полную социально-демографическую информацию и принадлежащие людям, работающим в данный момент в сфере ЧКВ. Всего было выбрано 100 наиболее информативных профилей. Ниже представлены полученные результаты.

*Возраст.* 73 % специалистов имеет возраст до 30 лет. 20 % – от 30 до 35 лет. И лишь 7 % – старше 35 лет. Видно, что в профессиональной сфере специалистов по проектированию информационных моделей в существенно большей степени работает молодежь.

*Пол.* 37 % – женщины, 63 % – мужчины.

*Трудовой стаж.* На основе полученных данных (рис. 1) можно констатировать, что лишь немногие представители профессиональной области, хотя бы по формальному критерию длительности пребывания в профессии, достигли экспертного уровня.

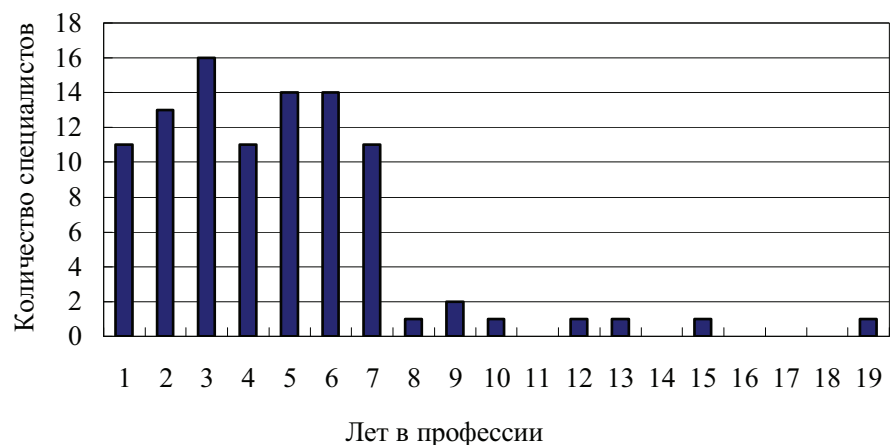


Рис. 1



Эксперименты К. А. Эриксона показали, что путь от новичка до эксперта, находящегося на вершине профессионального мастерства, требует не менее 10 лет интенсивной практики, причем этот отрезок времени является примерно одинаковым для столь разных областей человеческой деятельности, как медицина, игра в шахматы и т. д. [2]. Очевидно, что молодые люди, работающие в сфере ЧКВ, не имеют профессионального образования, а опыт работы приобретают в ускоренном режиме в процессе самой деятельности.

*Частота смены мест работы.* Средняя частота смены места работы 1,5 года. Смена должности внутри одной организации отмечена только у 3 % специалистов из выборки.

*Образование.* За основу классификации типов образования была взята система УДК (универсальная десятичная классификация) по причине ее подробности и присутствия в ней всего спектра современных профессий. 37 % специалистов имеют образование в сфере информационных технологий (004 «Информационные технологии»). 16 % – в области психологии (159.9 «Психология»). 9 % – в различных отраслях дизайна (74 «Рисование и черчение. Дизайн»). Образование остальных специалистов распределяется следующим образом: 9 % – 62 «Инженерное дело», 9 % – 33 «Экономика», 6 % – 53 «Физика», 5 % – 51 «Математика». 9 % специалистов имеют два образования.

*Первичная специализация.* 43 % специалистов, вошедших в выборку, ранее работали в других областях деятельности, лишь в некоторых случаях связанных с проектированием человекокомпьютерных систем. Как видно по результатам (см. таблицу), наибольшее количество специалистов приходит из областей, имеющих отношение либо к программированию, либо к дизайну.

Область	Количество специалистов, %
Дизайн (графический)	32,56
Веб-дизайн, верстка	23,26
Программирование	18,60
Маркетинг	9,30
Издательская деятельность	4,65
Эргономика, инженерное дело, банковское дело, архитектура и HR	11,00

**Теоретико-психологический и методологический подход к анализу деятельности специалистов по проектированию информационных моделей.** В последние десятилетия зарубежные инженерно-психологических работы развиваются в русле антропоцентрической парадигмы, которая интерпретирует технику (компьютер) как элемент человеческой деятельности, как артефакт – понятие,

заимствованное из когнитивной антропологии и означающее любой материальный объект, изготовленный человеком [3]–[5]. Опираясь на тезис Л. С. Выготского о том, что высшая ментальная активность человека порождается культурно опосредованной практической деятельностью и в целом опосредована знаками («психологическими инструментами») широкого класса семиотических форм (структуры естественного языка, схемы, карты и пр.) [6], зарубежные авторы формулируют основной принцип исследования – *инструментальное опосредование деятельности*, подразумевая, что исследоваться должны не сами инструменты (объекты, артефакты), а те значения и смыслы, которые появляются у человека в процессе взаимодействия с ними. Таким образом, речь идет об исследовании познавательных процессов человека, деятельность которых опосредована взаимодействием с инструментами, при этом понятие инструмент (артефакт) может трактоваться очень ши-

роко: от объектов (например, компьютер, техника, социотехническая среда и пр.) до символических продуктов деятельности человека (дискурс, речь, знания, роли, сценарии и пр.). Методологическим приемом таких исследований является *когнитивный анализ деятельности*, под которым понимается процесс создания концептуальной модели деятельности путем описания и анализа действий (когнитивных операций) специалиста (пользователя) в процессе решения им своих задач с помощью артефактов [2].

В основу осуществленного нами анализа деятельности положена построенная на этой идее концепция Ю. Энгестрема [4], которая в достаточно формализованном виде, известном как треугольник Энгестрема, задает контекст деятельности в виде элементов (субъект, объект, инструмент, правила, сообщество, структурные подразделения), при этом «ребра» треугольника показывают, с помощью каких элементов опосредуется деятельность субъекта над объектом (рис. 2).

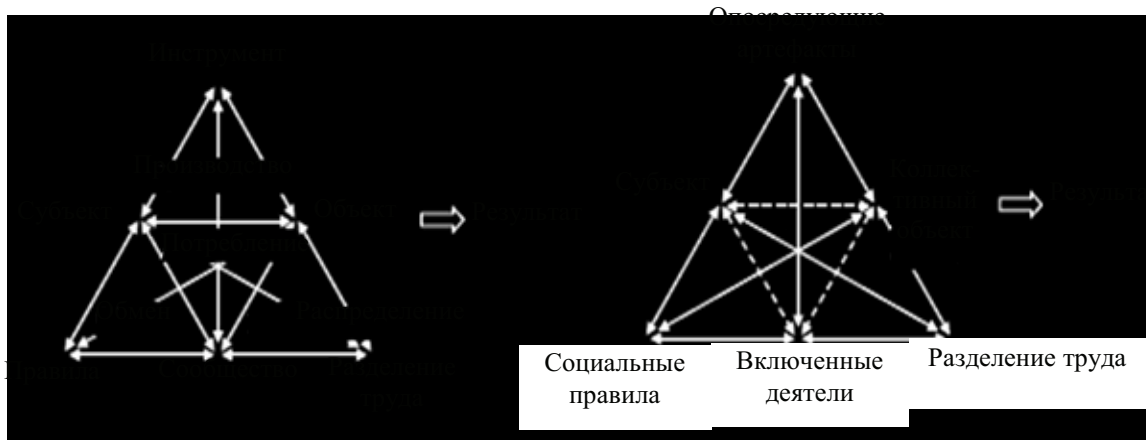


Рис. 2

Данная методология когнитивного анализа деятельности иллюстрирует отношения между конкретными сотрудниками, их коллегами в процессе совместной деятельности, а также факторами, опосредующими эти взаимодействия [7]. Ю. Энгестрем пишет, что деятельность обладает не аддитивной, а системной структурой, и изменение одних ее элементов неизбежно влияет на другие. В случае коллективной деятельности субъект является частью сообщества и воздействует на объект совместно с этим сообществом. Каждая из связей между основными элементами деятельности является не прямой, а опосредованной некоторым артефактом. Так, связь между субъектом и объектом опосредуется инструментами, т. е. всем, что используется в процессе трансформации, включая как физические, так и психические инструменты.

Основной частью разработанной нами анкеты для специалистов исследуемой области является таблица, построенная на основе методологии когнитивного анализа деятельности Ю. Энгестрема. При использовании в разработке модификации данной методологии Н. Боером [7] была проведена декомпозиция «треугольников» для каждого конкретного процесса в общую схему, отражающую картину деятельности специалистов в сфере ЧКВ в российских организациях.

На рис. 2 треугольник слева иллюстрирует систему деятельности согласно представлениям Ю. Энгестрема. Треугольник справа – адаптация системы деятельности Н. Боером, примененная в данном исследовании. Разработанная на основе этих представлений анкета для проведения исследования специалистов в российских организациях включала следующие пункты.

*Субъект* – лицо, которое участвует в описываемом им процессе (респондент является субъектом). В результирующей анкете субъект представлен в соответствии со своей должностью.

*Объект* – тот предмет, на который направлена деятельность. В сфере проектирования ЧКВ таким объектом является разрабатываемый продукт.

*Инструмент* – способ или метод, с помощью которого деятельность осуществляется. Респонденты описывают инструменты в графе таблицы «Инструмент».

*Правила (Социальные правила)* – те формальные и неформальные правила, на основе которых специалисты строят свою деятельность в конкретном коллективе. Это те регулирующие деятельность компоненты, которые респонденты указывают в описании методов (графа «Методы»).

*Сообщество (Включенные деятели)* – другие субъекты, вовлеченные в данный процесс (чаще всего коллеги). В анкете представлены в графе «Люди».

*Разделение труда* – этот пункт включает структурные подразделения, которые включены в процесс (графа «Люди/Подразделения»).

Специалисты описывали свою деятельность, исходя из заданного алгоритма.

Далее полученные результаты были структурированы и классифицированы тремя экспертами, имеющими стаж работы в сфере ЧКВ не менее 3-х лет и сменившими как минимум два места работы за время профессиональной деятельности. Процедура классификации проходила в форме совместной дискуссии в соответствии с методикой «Метаплан». «Метаплан» подразумевает совместное структурирование информации экспертами. В результате проведения методики и обработки результатов анкеты были получены классификации процессов и результатов деятельности. Методика «Метаплан» является качественной и не предполагает количественных данных.

**Результаты эмпирического исследования. Рабочие процессы.** Было выделено семь основных процессов, в рамках которых протекают подпроцессы:

- обсуждение целей и задач;
- постановка задач;
- создание нормативных документов;
- подготовка требований к проектируемому продукту и документации, помогающей в процессе проектирования;
- проектирование;
- оценка;
- передача проектной документации в отдел разработки.

Более подробная декомпозиция процессов деятельности представлена на рис. 3.

Процессы

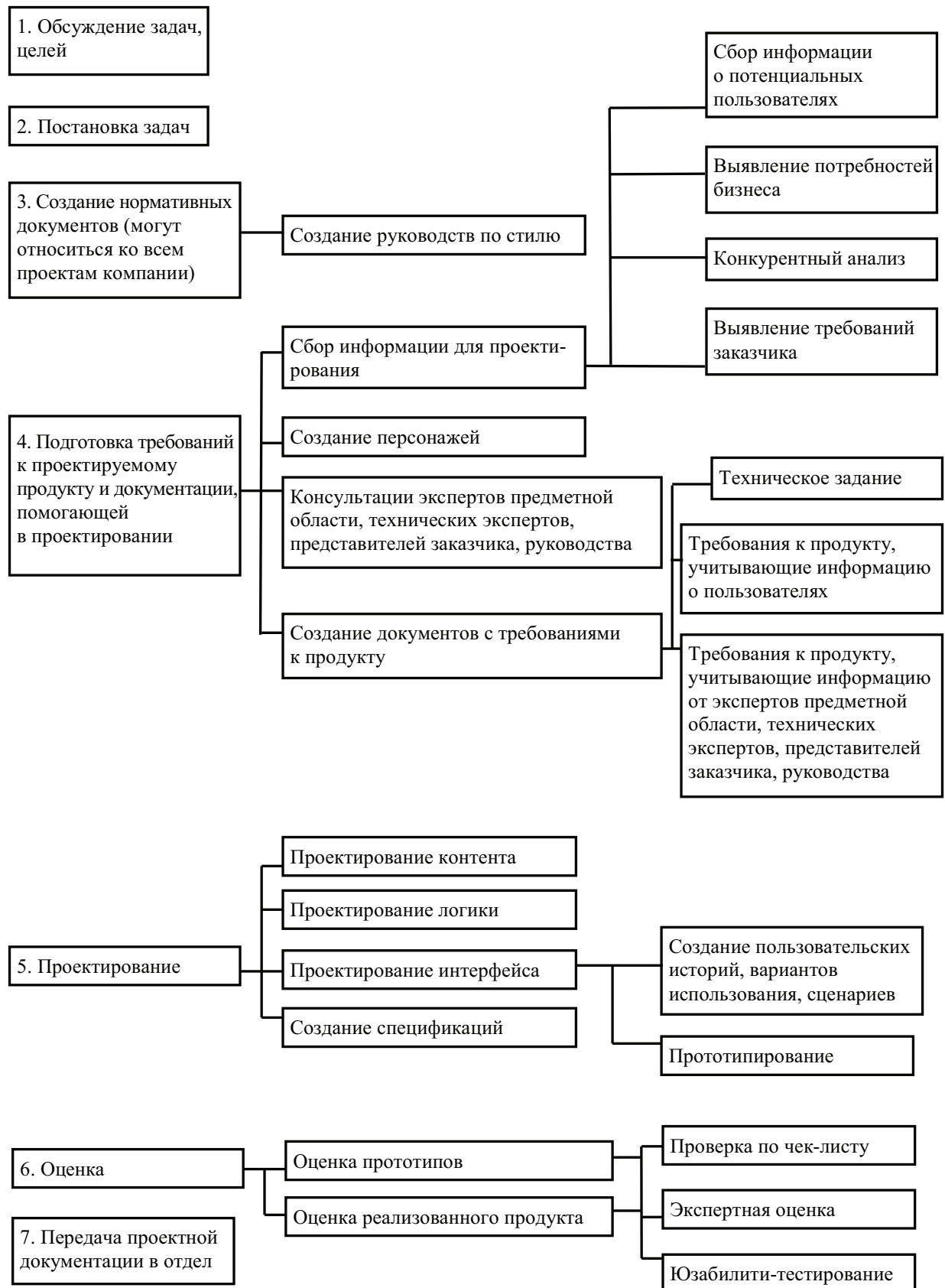


Рис. 3

*Обобщенная схема деятельности специалистов по ЧКВ.* Обобщенная схема деятельности специалистов представлена на рис. 4. Особый интерес здесь вызывает описание инструментов деятельности. Как видно, лишь немногие инструменты и методы психологической науки применяются в деятельности специалистов по ЧКВ.

*Результаты процессов.* Все получаемые результаты процессов можно разбить на три категории: материальный результат (рис. 5, а), общее понимание (разделенное понимание) (рис. 5, б) и действие (рис. 5, в).

Под материальным результатом подразумевается любой материальный объект (прототип, документ), который рождается в процессе деятельности.

Феномен «общего понимания» имеет прямое отношение к понятию knowledge sharing (разделение знаний), под которым понимается процесс передачи и получения знаний между людьми (трансферт, взаимообмен), способствующий появлению нового и единого понимания решаемых в организации задач.

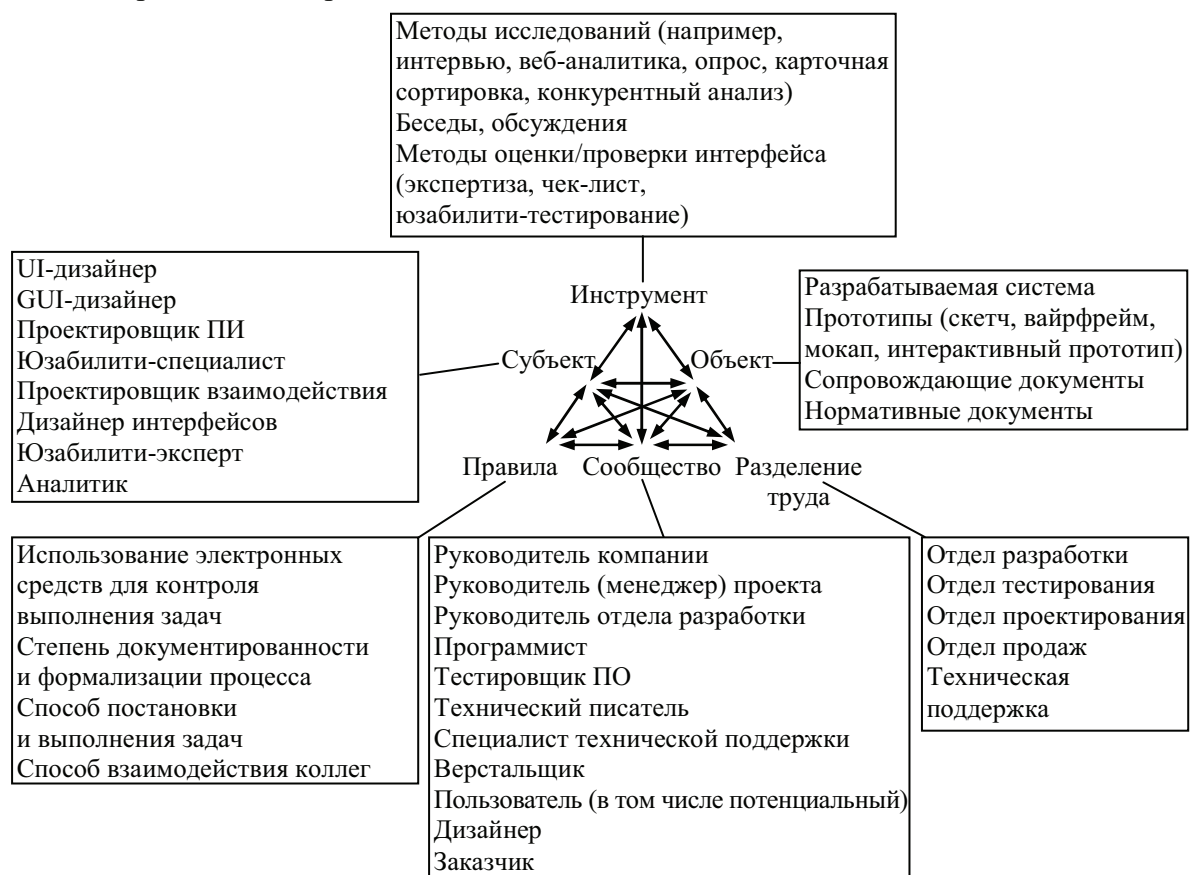


Рис. 4

В категорию «действие» попадают все предпринятые после окончания процесса шаги, являющиеся его прямыми следствиями (изменения в продукте, изменения в процессе работы).

В статье описаны результаты исследования, нацеленные на эксплицирование представлений о деятельности специалистов в сфере человекокомпьютерного взаимодействия. Исследование показало, что специалистами данной профессиональной области в России являются в основном молодые люди от 22 до 35 лет, имеющие различный тип профильного образования. Примерно в половине случаев до прихода в сферу ЧКВ специалисты имели иной род профессиональной деятельности. Большинство специалистов имеют стаж не более 7 лет. Область характеризуется высокой мобильностью кадров, смена работы (организации, компании и пр.) происходит примерно раз в 1,5 года.

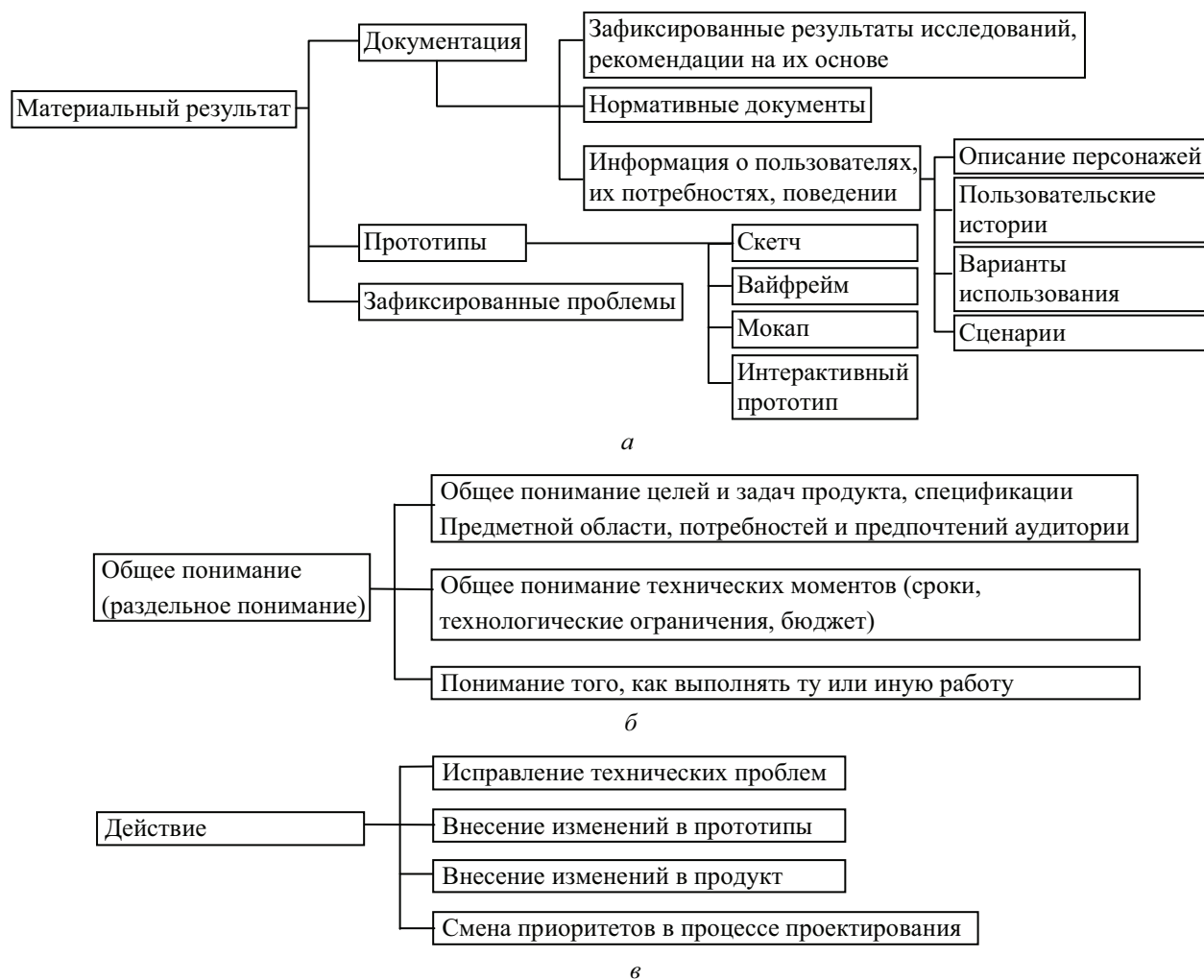


Рис. 5

Результаты исследования позволили отобразить общую картину деятельности специалистов в сфере эргономического проектирования информационных моделей в отечественных организациях. Полученные сведения дают представление о потребностях отечественных организаций в специалистах по человекокомпьютерному взаимодействию, что позволит сформулировать требования к обучению специалистов, а также подойти вплотную к разработке обучающих курсов по дисциплинам «Когнитивная эргономика» или «Человекокомпьютерное взаимодействие».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Величковский Б. М. Когнитивная наука: Основы психологии познания: в 2 т. М.: Смысл, Изд. центр «Академия», 2006.
2. Ericsson K. A., Lehmann A. C. Expert and Exceptional Performance: Evidence of Maximal Adaptation to Task Constraints // Annual Review of Psychology. 1996. Vol. 47. P. 273–305.
3. Коул М. Культурно-историческая психология. М.: Когито-центр, 1997.
4. Engeström Y., Miettinen R. Introduction to Perspectives on Activity Theory. Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1999.
5. Kuutti K. Activity Theory as a Potential Framework for Human-Computer Interaction Research // Context and Consciousness: Activity Theory and Human-Computer Interaction. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
6. Выготский Л. С. Избранные психологические исследования. М.: АПН РСФСР, 1956.
7. Boer N. Knowledge sharing within organization: A situated and relational Perspective. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 2005.

M. A. Antropova, K. R. Chervinskaya

*JOB ANALYSIS OF HUMAN COMPUTER INTERACTION SPECIALIST IN RUSSIAN ORGANIZATION*

*The article is devoted to research of labor activity of human computer interaction specialists in Russian organizations. The theoretical and methodological foundations of psychological analysis of the experts on re-engineering information models is denoted. On the base of methodology suggested by Y. Engestrem and it's modification suggested by N. Boer, descriptions of the processes in which a human computer interaction specialist is involved, general decomposition of these processes into subjects, objects, tools, rules, specialists and structure departments involved in the process, were received. Three types of labor processes results are distinguished: material result, divided understanding and action.*

**Human-computer interaction, job analysis, knowledge sharing**



# **УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ИННОВАЦИОННЫЙ И АНТИКРИЗИСНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ**

УДК 338.1

*И. Г. Кадиев, Д. А. Мардас*

## **УПРАВЛЕНИЕ ИНВЕСТИЦИОННО-ИННОВАЦИОННЫМ ПОРТФЕЛЕМ КРУПНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ (КОРПОРАЦИИ)**

*Рассматриваются вопросы, связанные с формированием портфеля инноваций крупного предприятия (корпорации). Предложена модификация классической матрицы БКГ для выбора инвестиционно-инновационной стратегии.*

**Инновационное развитие, инвестиции, инновации, модифицированная матрица БКГ, инвестиционно-инновационный портфель предприятия (корпорации)**

Разработка стратегии предприятия, как правило, предполагает выбор между экстенсивным ростом в рамках существующих бизнес-процессов и интенсивным ростом, обеспечиваемым конкурентными преимуществами, в свою очередь возникающими в результате инновационной деятельности. Таким образом, перед руководством всегда встает дилемма: инвестировать в механическое расширение или направить средства на формирование портфеля конкурентных преимуществ (продуктовых или процессных инноваций). В итоге результативность стратегии во многом будет определяться степенью адекватности в оценке перспектив рынка и будущего положения компании и ее бизнес-единиц.

Для определения настоящего и будущего положения бизнеса чаще всего используют портфельные модели анализа стратегии [1]. С их помощью и выбирают стратегию роста (в этом случае портфельную), обеспечивающую достижение целей предприятия.

Классическая портфельная модель – матрица Бостонской консалтинговой группы (БКГ) – есть логическое продолжение представлений о жизненном цикле товара. Принято считать, что на стадии зрелости и на заключительной стадии цикла успешный бизнес и его товары генерируют денежную наличность, тогда как на стадиях становления и роста происходит, как правило, поглощение денежной массы. Поэтому модель указывает на четыре основные позиции:

- 1) высококонкурентный бизнес на быстрорастущих рынках («звезда»);
- 2) высококонкурентный бизнес на зрелых, насыщенных, подверженных застою рынках (приносящая устойчивую прибыль «дойная корова» или «денежный мешок»);



3) бизнес, не имеющий хороших конкурентных позиций, но действующий на рынке с неясным будущим («знак вопроса»);

4) низкоконтурный бизнес на рынке, находящемся в состоянии застоя («собака»).

Очевидный вывод из этой классификации: для успешности компании денежная масса, появляющаяся в «зрелом» бизнесе, должна хотя бы частично инвестироваться в новые области, способные стать генераторами прибыли. Именно поэтому авторы модели БКГ рекомендуют при разработке стратегии пользоваться следующим набором решений и принципов формирования продуктового, а равно и делового, портфеля [2]:

- «звезды» оберегать и укреплять;
- по возможности избавляться от «собак», если нет веских причин для того, чтобы их сохранять;
- для «дойных коров» вводить жесткий контроль капиталовложений с передачей части денежной выручки под управление менеджеров высшего уровня (топ-менеджеров);
- «знаки вопроса», или «дикие кошки», подвергать специальному изучению, чтобы установить, не смогут ли они при известных капиталовложениях превратиться в «звезды».

Ясность этих рекомендаций и простота их графического представления привели к тому, что практически в каждом пособии по менеджменту, а уж тем более по маркетингу, присутствует красочная иллюстрация с «матрицей» БКГ (не содержащей, правда, никаких цифр) и многостраничные рассуждения о характеристиках всего «зоологического» ряда. Однако тривиальная трактовка жизненного цикла чаще всего оказывается не соответствующей реальному поведению бизнеса, а попытка применить на практике картинку с «зоосадам» (рис. 1) сразу же приводит к множеству вопросов:

- как измерить уровень конкурентоспособности?
- в чем выражаются возможности расширения рынка?
- как отличить «высокие» возможности и уровни от «низких» и т. д.



Рис. 1

В итоге, чтобы применить матрицу БКГ для формирования делового или продуктового портфеля, компании на практике требуется квантификация понятий «возможности расширения отраслевого рынка» и «уровень конкурентоспособности». Для продуктового портфеля, как правило, в качестве таковых избирают темпы роста рынка (объемов продаж) и относительную долю рынка соответственно [3].

Темпы роста рынка характеризуют движение продукции на рынке, т. е. изменение объемов реализации (объемов продаж). Таким образом, индекс роста (ТР) по каждому товару может быть рассчитан как отношение объема реализации за текущий ( $n$ ) и предшествующий ( $n - 1$ ) периоды:

$$TP = \frac{Y_n}{Y_{n-1}},$$

где  $Y_n$  и  $Y_{n-1}$  – объемы в денежном или натуральном выражении. При использовании в качестве показателя «возможности расширения рынка» среднегодового темпа индекс роста вычисляется по формуле

$$TP = n-1 \sqrt{\frac{Y_n}{Y_1}},$$

т. е. через значение объема реализации за  $n$ -й (текущий) и первый (базовый) периоды.

Показатель уровня конкурентоспособности – относительная доля рынка (ОДР) – квантифицируется отнесением доли предприятия на рынке ( $ДР_{пр}$ ) к доле ведущей конкурирующей фирмы ( $ДР_{в.к}$ ):

$$ОДР = \frac{ДР_{пр}}{ДР_{в.к}}.$$

При этом абсолютные доли рынка, в свою очередь, находятся как отношение объема реализации к емкости рынка данной продукции.

В качестве границ между низкими и высокими показателями при построении матрицы избирают срединный индекс роста

$$\overline{TP} = (TP_{max} + TP_{min}) / 2$$

и единицу для относительной доли рынка, т. е. равенство конкурентоспособности компании и лидера отрасли.

Попытка распространить данный формализм на инвестиционно-инновационный портфель предприятия наталкивается на ряд трудностей. Дело в том, что первоначально модель БКГ предполагала построение продуктового портфеля для предприятия с централизованной структурой и управлением. В современных же условиях сфера деятельности компаний, как правило, сегментируется и создаются стратегические хозяйственные зоны (СХЗ). Крупные компании превращаются в корпорации и передают функции стратегического планирования в свои подразделения, т. е. в СХЗ. Каждая зона самостоятельно занимается как разработкой, так и реализацией собственных стратегических планов. Это позволяет в наибольшей степени учесть специфику хозяйствования на уровне отдельных подразделений, создает возможности гибкой реакции на запросы потребителей и воздействие внешней среды в целом.

Вместе с тем, у руководства корпорации в этом случае возникают трудности в формировании и реализации общефирменной стратегии. Объясняется это тем, что самостоятельные СХЗ мало заинтересованы в коммерческом успехе своих партнеров, которые становятся конкурентами в борьбе за инвестиции со стороны центрального руководства. Успешные СХЗ, кроме того, не желают делиться прибылью. Согласовывать интересы отдельных зон и вырабатывать общефирменную инвестиционную (а следовательно, и инно-

вационную) стратегию высший менеджмент вынужден в ходе переговоров с менеджерами региональных и продуктовых подразделений. При этом требуется объективно подтвердить предлагаемые как высшим менеджментом, так и менеджментом СХЗ, альтернативы. Таким подтверждением снова может стать матрица БКГ, однако ее построение в этом случае будет иметь серьезную специфику.

Специфика определяется наличием информации о конкурентах компании и, соответственно, возможностью квантифицировать уровень конкурентоспособности. Если удастся получить данные об абсолютных долях рынка конкурентов, то матрицу БКГ можно построить в координатах «темпы роста отрасли», понимая под таковой вид бизнеса корпорации, и «относительная доля рынка», рассчитывая ее для каждой СХЗ. Выбор границ между квадрантами и построение самой матрицы в этом случае ничем не отличается от процедуры, изложенной ранее. Отметим только, что получаемые выводы следует относить к распределению и перемещению инвестиционных средств корпорации между СХЗ, т. е. к инвестиционному, а не продуктовому портфелю.

Чаще, однако (а в российских условиях практически всегда), менеджерам приходится довольствоваться информацией о собственной компании и рассчитать показатель ОДР для отраслей корпоративного бизнеса не удастся. Это вынуждает изменить порядок расчетов и интерпретацию управленческих следствий из геометрических построений и «зоологических» исследований в классической модели БКГ.

При решении такой задачи следует прибегнуть к оценке позиций СХЗ компании с помощью *модифицированной матрицы* БКГ. Модификация предполагает, что, ввиду отсутствия необходимых данных о конкурентах, матрицу строят в координатах относительных величин темпов роста (ОТР) и доли покрытия (ОДП), причем относительность здесь означает, что соответствующий показатель конкретной СХЗ оценивается в сравнении с ростом и долей покрытия затрат корпорации в целом.

Поясним смысл и порядок использования введенных понятий.

Рентабельность производственной деятельности корпорации может быть оценена как отношение прибыли к общему объему реализации продукции:

$$P_{\text{корп}} = \frac{ПР_{\text{корп}}}{V_{\text{реал}}},$$

Очевидно, что если рентабельность отдельно взятой СХЗ ниже рентабельности корпорации, то с данным бизнесом не все благополучно. Но в корпорации всегда будут отрасли как с меньшей, так и с большей рентабельностью. Следовательно, знание только показателей рентабельности не обеспечит формирование инвестиционно-инновационного портфеля.

Определим сумму покрытия (ПЗ) как превышение общей реализации ( $V$ ) над текущими затратами ( $Z$ ), т. е.

$$ПЗ = V - Z.$$

В экономическом смысле этот показатель есть максимально возможная (по результатам текущего периода) величина возврата на инвестиции, осуществленные в предшествующие периоды. Одновременно эта величина характеризует и возможности нового инвестирования.

Доля покрытия (ДП), выраженная отношением

$$\text{ДП} = \frac{\text{ПЗ}}{V_{\text{реал}}},$$

будет отражать эффективность хозяйственной деятельности по возврату инвестиций в соответствующем периоде. Естественно, что в корпорации эта эффективность проявляется с учетом удельного веса СХЗ. Удельный вес  $\alpha_j$  для  $j$ -й ( $j = 1, \dots, n$ ) СХЗ есть ее доля в общей реализации:

$$\alpha_j = \frac{V_{\text{реал}}^j}{\sum_j V_{\text{реал}}^j} = \frac{V_{\text{реал}}^j}{V_{\text{реал}}},$$

где  $\alpha_j$  – удельный вес;  $V_{\text{реал}}^j$  – объемы реализации соответствующей деловой единицы.

Тогда темп роста корпорации может быть рассчитан как средневзвешенная величина, т. е.

$$\text{ТР}_{\text{корп}} = \sum_{j=1}^n \alpha_j \text{ТР}_j. \quad (1)$$

Таким образом, в соответствии с указанными допущениями:

$$\text{ОТР}_j = \frac{\text{ТР}_j}{\text{ТР}_{\text{корп}}}, \quad (2)$$

$$\text{ОДП}_j = \frac{\text{ДП}_j}{\text{ДП}_{\text{корп}}} = \frac{\text{ПЗ}_j}{V_{\text{реал}}^j} \frac{V_{\text{реал}}}{\text{ПЗ}} = \frac{1}{\alpha_j} \frac{\text{ПЗ}_j}{\text{ПЗ}}.$$

Очевидно, что границей между низкими и высокими темпами роста следует признать равенство темпов роста СХЗ и корпорации, т. е.  $\text{ОТР} = 1$ . Тот же вывод следует и для оси ОДП.

Наряду с этим отметим, что корпоративный эффект отдельной СХЗ, интерпретируемый как инвестиционный источник для инновационной деятельности, будет определяться разницей между долей покрытия и рентабельностью. Чем больше эта разница у конкретной деловой единицы, тем больше ее вклад в инвестиционно-инновационный портфель компании.

Трудность, однако, состоит в том, что в абсолютном большинстве российских корпораций финансовые (в том числе инвестиционные) потоки предельно централизованы и, несмотря на диверсификацию деятельности и достаточную автономность, их подразделения ограничены в формировании портфеля инноваций. Поэтому формирование рационального инвестиционно-инновационного портфеля крупного предприятия необходимо осуществлять не в целях «покрытия затрат» (т. е. для максимизации доходов сторонних инвесторов), а в целях повышения эффективности основной деятельности. Иначе говоря, выбор объектов инвестирования руководству следует осуществлять с использованием показателя «доля затрат», т. е. отношения суммы переменных затрат филиала (линейного подразделения) к его выручке по основной деятельности:

$$ДЗ = \frac{З_{пер}}{V_{осн}},$$

где ДЗ – доля затрат;  $З_{пер}$  – переменные затраты подразделения;  $V_{осн}$  – выручка по основной деятельности.

Очевидно, что аналогичный показатель может быть построен и для корпорации в целом:

$$ДЗ_{корп} = \frac{З_{пер}^{корп}}{V_{осн}^{корп}}.$$

Введем теперь относительную долю затрат как отношение вида

$$ОДЗ = \frac{ДЗ}{ДЗ_{корп}}.$$

Тогда, используя уже введенные ранее темп роста корпорации и относительный темп роста (1) и (2), рассчитываемые по выручке, можно построить еще одну модификацию матрицы БКГ, но вполне применимую для предприятий с полной централизацией денежных потоков (рис. 2 – рекомендации модифицированной матрицы БКГ по формированию инвестиционно-инновационного портфеля).



Рис. 2

Предложенные модификации превращают модель БКГ в реальный инструмент управления инвестиционно-инновационной деятельностью предприятия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляева О. А., Мардас Д. А. Модели построения делового портфеля в рамках корпоративной стратегии // Изв. ПГУПС. 2007. № 1. С. 140–153.
2. Томпсон А. А., Стрикленд А. Дж. Стратегический менеджмент. Концепции и ситуации для анализа. М.: Вильямс, 2003.
3. Мардас А. Н., Кадиев И. Г., Гуляева О. А. Стратегический менеджмент: учеб. пособие. СПб.: ООО «Технолит» / Технолит, 2011.

*I. G. Kadiev, D. A. Mardas*

*MANAGEMENT OF INVESTMENT AND INNOVATION PORTFOLIO OF LARGE ENTERPRISE (CORPORATION)*

*Issues of creation of innovation portfolio of large enterprise (corporation) are considered in the article. A modification of the classical matrix BCG for the selection of investment and innovation strategy is proposed.*

**Innovative development, investment, innovation, modified matrix BCG, an investment and innovation portfolio of the enterprise (corporation)**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ЭВАЛЮАЦИИ

*Описываются подходы при моделировании управления образовательными программами и проектами с использованием аппарата эвалюации, представлены виды связей в эвалюации, описаны два подхода к построению причинно-обусловленных моделей, представлены примеры практического применения результатов моделирования образовательной эвалюации.*

### Образование, управление, эвалюация, моделирование в образовании

В настоящий момент российская система профессионального образования переживает интенсивный период модернизации, связанный с освоением новых федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) и внедрением уровневой подготовки специалистов. Действующие модели функционирования образовательных организаций профессионального образования, их структура, приоритеты и правовая основа деятельности подвергаются существенным изменениям, условия протекания которых и последствия требуют тщательного отслеживания, анализа и прогнозирования.

Учитывая тенденции научных исследований в сфере образования, использование аппарата эвалюации позволит решать поставленные задачи с помощью моделирования процессов взаимодействия объектов образовательной системы [1].

Причинно-обусловленное моделирование является, вероятно, самым распространенным подходом к построению теории в социальных науках, в том числе в образовательной эвалюации, словом везде, где анализируется поведение людей по некоторой концептуализированной переменной или набору переменных (конструкт). В процессе анализа ставится вопрос о том, что является причиной тех или иных изменений. Например, студенты, обучающиеся в вузах, отличаются по уровню освоения компетенций. Вопросы, которые можно поставить в данном случае, имеют вид: каковы причины этих вариаций? что в наибольшей степени влияет на освоение компетенций? Причинно-обусловленный анализ включает идентификацию связей между переменными, которые рассматриваются в контексте того, как вариация одной переменной приводит к вариации другой переменной. В нашей стране такого рода анализ в образовании не получил должного развития в силу недостаточности фундаментальных и прикладных научных исследований по измерениям и эвалюации в социальных науках.

Моделирование, которое находит свое применение в эвалюации и менеджменте, носит причинно-следственный характер. Следуя словарю бизнес-терминов (Академик.ру. 2001), можно утверждать, что причинно-следственное моделирование – это способ имитационного прогнозирования будущего по результатам статистического анализа зависимости между рассматриваемым и другими факторами.

При проведении эвалюации в образовании целесообразно использовать причинно-обусловленное моделирование, которое включает и качественный, и количественный анализ, поскольку допускает использование описательных моделей наряду с математическими [2].

При идентификации причинных связей анализ обычно бывает направлен на определение так называемых эффектов влияния переменных. Эти эффекты являются сущностью причинно-обусловленного моделирования, а их оценка – целью построения причинно-

обусловленных моделей, ядро которых составляют шесть видов причинно-обусловленных связей и концепция причинности, лежащая в основе моделирования. В число этих шести связей в эвалюации входят: прямые, косвенные, замедленные, взаимно-обусловленные, ложные и неанализируемые связи.

Помимо перечисленных видов связей в эвалюации необходимо рассматривать прогнозирующие связи, лежащие вне сферы причинно-обусловленного моделирования. В процессе их рассмотрения нередко ставится вопрос: «Будет ли вариация по переменной А связана с вариацией по переменной В?» При решении этого вопроса сосредотачиваются на анализе простой ассоциации, когда в результате ассоциативных связей вторая переменная является следствием первой. Здесь нет никакого предположения о причинной обусловленности, кроме той, что вариация по переменной А связана с вариацией по переменной В. Если можно идентифицировать такие связи, то, зная вариацию по А, можно предсказать вариацию по второй переменной, не выявляя причину вариации переменной В.

Например, один из аспектов эвалюации процесса отбора персонала касается предсказания потенциального успеха претендентов в дальнейшей профессиональной деятельности на основе выделения переменных, которые предскажут этот успех. В основном, в процессе эвалюации у исследователей не возникает вопроса относительно того, существуют ли причинно-обусловленные связи между переменными, используемыми для предсказания успеха и факторами, определяющими реальный успех в деятельности. Они лишь заинтересованы в наиболее правдоподобном предсказании успеха профессиональной деятельности.

В отличие от прогнозирующе-ассоциативных связей причинно-обусловленные связи обращаются к трактовке причинной обусловленности, в соответствии с которой одна из переменных  $X$  влияет на другую переменную  $Y$ . Природа причинной обусловленности интенсивно обсуждалась в философии не только в XX, но и в XXI веке. Большинство из рассматриваемых подходов сходились только в том, что причинно-обусловленная связь сложное понятие, которое в большинстве случаев неизбежно порождает двусмысленное толкование [3].

Исследователи обычно анализируют причинную связь в терминах вариации: переменная  $X$  является причиной для переменной  $Y$ , если изменения по  $X$  вызывают изменения по  $Y$ . Как правило, непосредственно такие изменения не наблюдаются, поскольку чаще всего они носят латентный и отсроченный характер. В лучшем случае можно только зафиксировать вариацию по одной переменной, сопровождаемую в более позднее время вариациями другой переменной. Такие изменения, как было отмечено, могут быть следствием не только причинно-обусловленных, но и ассоциативных связей. Поэтому наличие последующей вариации переменных является необходимым, но не достаточным условием существования причинно-обусловленных связей.

Согласно утверждению Russell, причинно-обусловленные связи могут быть установлены однозначно только в полностью изолированной системе. Если можно предполагать, что в системе нет никаких других переменных, кроме анализируемых, то изменения по переменной  $X$ , которые сопровождаются изменениями по переменной  $Y$ , действительно показывают на причинно-обусловленную связь. Если же в системе есть другие переменные и контекстные факторы влияния, как это всегда бывает в реальной ситуации исследования, то причинно-обусловленные связи могут существовать даже при том, что наблюдения пока-

зывают, что переменные  $X$  и  $Y$  полностью не связаны друг с другом. Точно так же причинно-обусловленные связи могут не существовать даже при наблюдении тесной связи между переменными  $X$  и  $Y$ . Как правило, проблема осмысления причинно-обусловленных связей и их установление достаточно сложны и относятся, скорее, к сфере философии, а не эвалюации и потому обычно не рассматриваются в исследованиях в образовании [2].

Несмотря на сложность анализа и отсутствие однозначной трактовки, причинные связи находят широкое применение в социальных научных теориях и доминируют в эвалюации. Это связано с тем, что на их основе можно оценить систематические связи между переменными и управлять теми переменными, которые подлежат изменению. В процессе эвалюации стараются установить силу связи и меру правдоподобия гипотезы, предполагающей причинно-обусловленный характер связей переменных.

Для конструкторов, трактуемых с помощью причинно-обусловленных связей, характерны некоторые общие черты, с которыми соглашается большинство ученых в сфере эвалюации. Во-первых, если переменная  $X$  причина для переменной  $Y$ , являющейся эффектом, то вариация по  $X$  должна вызывать вариацию по  $Y$ . Во-вторых, причина всегда должна предшествовать эффекту. В-третьих, период, в течение которого можно наблюдать, как вариация по  $X$  вызывает вариацию по  $Y$ , может меняться в широких пределах, от мгновенного изменения до десятков лет и даже десятилетий. В-четвертых, сила эффекта при анализе влияния  $X$  на  $Y$  может изменяться в зависимости от контекста анализа, т. е. от набора контекстных факторов, задействованных в оценочных процессах. В-пятых, причина и следствие должны быть включены в определенное пространственное соприкосновение или должны быть связаны цепочкой промежуточных событий.

Для переменных, связанных причинно-обусловленной зависимостью, в эвалюации приняты определенные названия: переменную  $X$  (причина) называют независимой переменной или детерминантом. Предполагаемый эффект (переменная  $Y$ ) называют зависимой переменной или переменной результата.

При построении причинно-обусловленных моделей в эвалюации используют одну или несколько возможных видов причинных связей, к числу которых относятся: прямая, косвенная, ложная, модерируемая, двунаправленная и неанализируемая причинно-обусловленная связь.

Графически эти связи можно изобразить в виде направленных отрезков прямых, соединяющих переменные (рис. 1,  $a - e$ ). На рисунке переменные обозначены прямоугольниками, а причинная связь представлена стрелкой, указывающей на переменную-эффект. Такого вида графики называют диаграммой пути по терминологии, принятой в теории моделирования структурными уравнениями [4].

Рис. 1,  $a$  показывает прямую причинно-обусловленную связь, в которой причина на диаграмме пути, как предполагается, оказывает прямое влияние на некоторую переменную результата. Примеров такой связи в эвалюации можно встретить очень много, хотя ее не всегда выбирают исследователи, поскольку она излишне упрощенно трактует связь событий и явлений. Например, качество измерителей при аттестации студентов на основе ФГОС напрямую влияет на качество результатов аттестации при оценивании компетенций с точки зрения надежности и валидности результатов измерения [5]. Однако надежность



зависит не только от качества инструментария, но и от организации самой процедуры измерения, отсутствия списывания и подсказок, точности инструкций и т. д. Использование прямой связи в данном случае, как и во многих других ситуациях, не позволит принять во внимание все эти факторы, также влияющие на качество результатов измерений.

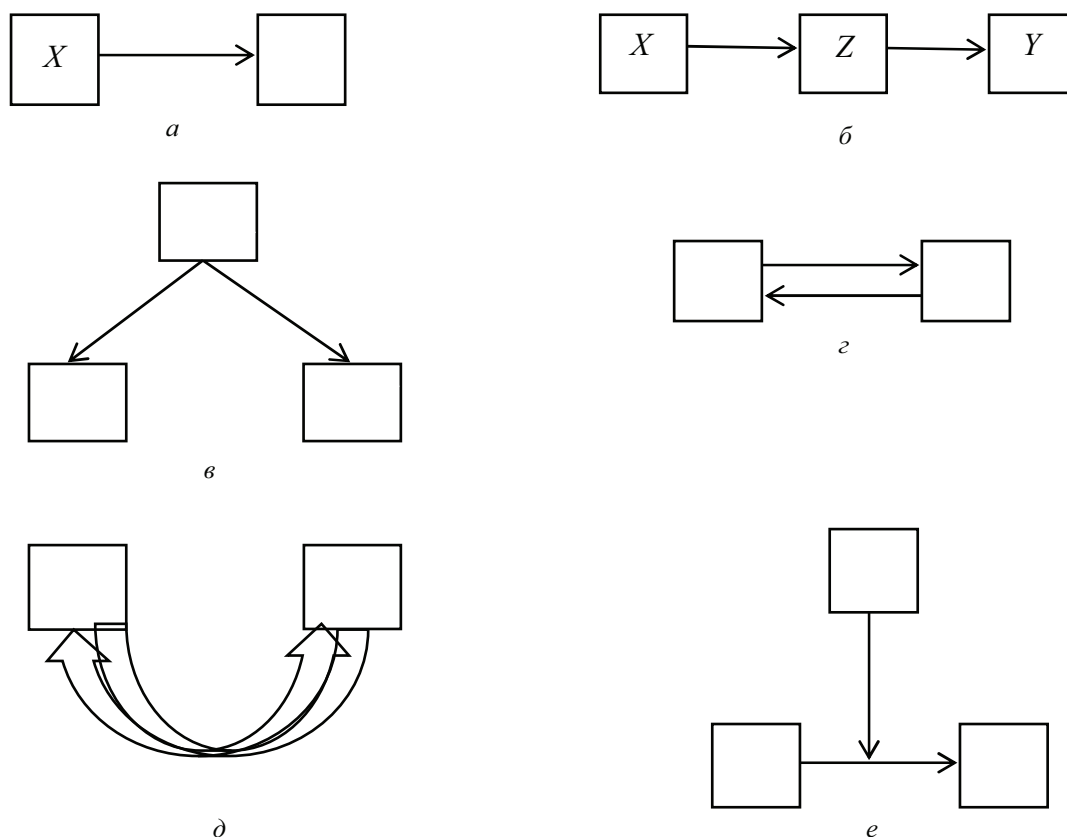


Рис. 1

Косвенные причинные связи используются в тех случаях, когда одна переменная влияет на другую переменную опосредованно, путем привлечения при воздействии промежуточной переменной (рис. 1, б). Косвенные связи иногда называют опосредованными. Как пример косвенных связей можно привести ситуацию влияния качества измерителей на мотивацию студентов к освоению компетенций. Опосредованной переменной в этом случае будет величина ошибки измерения, поскольку субъективные оценки, полученные с большой ошибкой измерения, снижают мотивацию студентов к обучению.

Ложными связями считаются те, которые соединяют две переменные, потому что они имеют общую причину, но не потому что одна из них является причиной другой (рис. 1, в). Примером ложных связей может послужить зависимость между размером обуви учащихся и коммуникативными умениями, оцениваемая на случайной выборке учащихся школы всех классов. Если вычислить корреляцию между размером обуви учащихся этой выборки и коммуникативными умениями, то она будет иметь довольно большое значение, которое, конечно, нельзя трактовать как существование причинно-обусловленных связей. Просто в выборке у учащихся младших классов, с более низкими коммуникативными умениями, меньший размер обуви, и обе эти переменные коррелированы с одной и той же причиной, которой является возраст детей.

Двунаправленные, или взаимные, причинные связи характерны для случая, когда две переменные оказывают влияние друг на друга (рис. 1, *з*).

Неанализируемые связи, представленные на рис. 1, *д*, включают переменные, которые связаны двунаправленной кривой линией. Эта линия, отличающаяся от прямой, указывает на коррелированность двух переменных, причины которой исследователь не склонен выяснять.

Моделируемые причинные связи, подобно ложным и косвенным связям, включают, по крайней мере, три переменные (рис. 1, *е*). В этом случае причинные связи между двумя переменными  $X$  и  $Y$  отличаются в зависимости от величины третьей переменной  $Z$ , которую называют “переменная модератор”.

Несомненно, что большинство причинно-обусловленных моделей включает несколько видов связей и потому описывают многомерный случай. В целом, подходы к построению причинно-обусловленных моделей делятся на два больших класса. В первом случае сначала идентифицируют переменную результата, а затем концептуализируют причины этой переменной для построения модели. Таким образом, первый шаг состоит в выборе переменной результата, которую хотят объяснить. Во втором случае исследователи строят модель, используя обратный процесс. Сначала они определяют интересующую их переменную, а затем ставят вопросы о возможных ее эффектах. В эвалюации используют обычно первый подход, поскольку, как правило, бывают определены цели проекта или программы.

При построении диаграммы пути сначала ограничиваются одной переменной, а затем расширяют их число путем превращения прямых связей в косвенные связи. Таким образом, в процессе эвалюации диаграмма пути подлежит непрерывному расширению и усложнению. Главная идея такого процесса состоит в том, что можно усовершенствовать теоретическую структуру – модель, в которой есть только прямые причины, превращая прямые причинно-обусловленные связи в косвенные причинно-обусловленные связи путем усложнения структуры и введения в нее промежуточных переменных. Такой процесс можно продолжать до тех пор, пока не будут исчерпаны все интересующие исследователя промежуточные переменные.

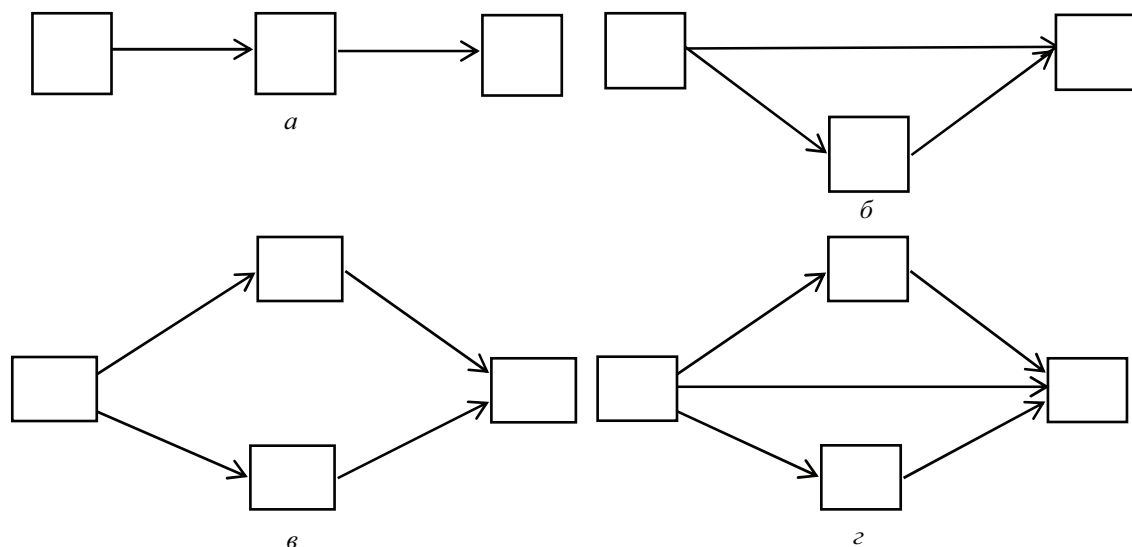


Рис. 2

Когда определена промежуточная переменная и включена в диаграмму пути, возникает новая проблема, связанная с типизацией ее вида (рис. 2). Рис. 2, *а* показывает косвенную связь, в которой воздействие переменной  $X$  на переменную  $Y$  опосредовано через переменную  $Z$ . Со-

гласно этой модели существует единственный путь, которым  $X$  влияет на  $Y$  посредством  $Z$ . Иначе говоря,  $Z$  полностью выполняет функцию промежуточной переменной, опосредуя любое воздействие  $X$  на  $Y$ . Поэтому  $Z$  называют полной промежуточной переменной.

В случае, представленном на рис. 2, б, переменная  $Z$  только частично опосредует эффекты воздействия  $X$  на  $Y$ . В дополнение к установленным эффектам при воздействии  $X$  на  $Y$  посредством  $Z$ ,  $X$  также имеет независимый эффект влияния на  $Y$ , который не может быть объяснен единственной промежуточной переменной. В этом случае  $Z$  является частичной промежуточной переменной для объяснения эффекта при воздействии переменной  $X$  на переменную  $Y$ .

Аналогичные ситуации, но для двух промежуточных переменных, представлены на рис. 2, в и г соответственно.

Представленный процессный подход к управлению этапами эвалюации непосредственно связан с проблемами управления качеством образования. Предложенные в данной статье модели имеют довольно широкое применение. Образовательная статистика, получаемая в процессе подведения итогов выполнения проектов и программ по модернизации отечественного образования, в настоящий момент не может эффективно использоваться в силу отсутствия должного аппарата для анализа и интерпретации. Такой аппарат представляет научно-обоснованная образовательная эвалюация, в основе которой лежат определенные причинно-обусловленные модели. Поэтому модернизация, протекающая в наши дни на всех уровнях системы образования, вызывает острую потребность в построении причинно-обусловленных моделей, обеспечивающих повышение эффективности управления системой образования. Результаты эвалюации, полученные на основе научно-обоснованных подходов, закладывают информационную базу, структура и наполнение которой способны обеспечить информацию для принятия не только оперативных, но, в первую очередь, стратегических управленческих решений по развитию образовательных программ и проектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуськова М. В. Эвалюация процесса и результатов внедрения федеральных государственных образовательных стандартов в практику высшего профессионального образования // Высшее образование сегодня. М., 2011. № 9. С. 10–13.
2. Patton M. Q. Utilization-focused evaluation: The new century text. Thousand Oaks, Calif., 1997.
3. Гуськова М. В. Философские парадигмы в развитии эвалюации // Материалы Междунар. науч.-практич. конф. ДГТУ. Ростов н/Д., 2011.
4. Bollen K. A. Structural equations with latent variables. New York: Wiley, 1989.
5. Звонников В. И. Измерения и качество образования. М.: Логос, 2006.

*M. V. Guskova*

#### *MODELING IN EDUCATIONAL EVALUATION*

*The article describes the approaches to modeling of management of educational programs and projects using evaluation technology, gives the types of connections in evaluation, describes two approaches to developing causal model, gives the examples of practical using of modeling results in educational evaluation.*

**Education, management, evaluation, modeling in education**



УДК 940.1

*В. В. Калашиников*

## **АГРАРНАЯ РЕФОРМА П. А. СТОЛЫПИНА: СУЩНОСТЬ, ПОТЕНЦИАЛ, АЛЬТЕРНАТИВЫ**

*Рассматривается аграрная реформа П. А. Столыпина как вариант консервативной модернизации российского общества в начале XX в. Выявляется сущность и потенциал столыпинских реформ и возможные альтернативы реформирования России в данный период ее истории.*

**П. А. Столыпин, аграрная реформа, Россия, консервативная модернизация, сущность, потенциал, альтернативы**

Интерес к П. А. Столыпину и его деятельности всегда был высоким в отечественной историографии. Этот интерес вызван тем, что в кризисный период истории страны именно П. А. Столыпин взялся проводить самую масштабную программу реформ в России начала XX в. Программа не была реализована. К моменту убийства П. А. Столыпина в сентябре 1911 г. ему немного удалось осуществить из задуманного. Далее Россия оказалась втянутой в мировую войну, которая требовала иных, более радикальных, решений назревших вопросов, а при отказе от таких решений сверху военная обстановка открывала путь радикальной революции снизу.

Незавершенный характер реформ сделал открытым вопрос об их потенциале. Он породил споры историков о том, насколько адекватными были реформы П. А. Столыпина реальной ситуации, сложившейся в России в начале XX в., имели ли они шансы на успех, открывали ли они перспективы для дальнейшего мирного эволюционного развития или, напротив, провоцировали революцию.

В советской историографии преобладала негативная оценка и личности реформатора, и замысла реформ, и их результатов<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Дубровский С. М. Столыпинская земельная реформа. М., 1963; Аврех А. Я. Столыпин и Третья дума. М., 1968; Он же. П. А. Столыпин и судьбы реформ в России. М.: Политиздат, 1991; Анфимов А. М. Столыпин и российское крестьянство. М.: ИРИ РАН, 2002.

В постсоветский период ряд историков встали на путь радикального пересмотра прежней историографической традиции и позитивно оценили личность, замысел и результаты реформ П. А. Столыпина<sup>1</sup>.

Однако такой пересмотр не получил общего признания. Проблема столыпинских реформ явно нуждается в дальнейшем и более объективном изучении, свободном от политической конъюнктуры и личных пристрастий.

В данной статье проводится анализ политической и социально-экономической сущности столыпинских реформ и их потенциала, т. е. способности разрешить назревшие проблемы общественного развития России в начале XX в. Поскольку сущность всей реформаторской концепции в наибольшей степени определяет аграрная реформа, ей и будет уделено основное внимание.

Прежде чем говорить о сущности аграрной реформы, поставим *вопрос о ее авторстве*. Многие историки подчеркивают, что разработка аграрной реформы началась задолго до 1906 г., что вопрос о разрешении крестьянам выходить из общины ставили Н. Х. Бунге и С. Ю. Витте еще в конце XIX в., что С. Ю. Витте вплотную занялся проблемой общины уже в 1902 г. Все это так. Однако вопрос об авторстве мы хотим поставить в иной плоскости: сделать акцент на том, что в самодержавной России последнее слово при выборе политического курса всегда оставалось за царем. И в случае с аграрной реформой, ключевой в политике П. А. Столыпина, именно царь определил главные принципы реформы. При чем сделал это без всякого участия П. А. Столыпина и за несколько месяцев до того, как тот появился в столице.

Первый существенный шаг в аграрной реформе был сделан 3 ноября 1905 г., когда на фоне волны крестьянских бунтов царь издал Манифест «Об улучшении благосостояния и облегчении положения крестьянского населения». В Манифесте говорилось о полной отмене выкупных платежей с 1 января 1907 г. Эта мера в историографии часто недооценивается, хотя она весьма существенна в материальном и в юридическом отношениях. В материальном плане отмена выкупных платежей означала снижение более чем на половину общей налоговой нагрузки на крестьян и почти полное устранение государственного налога. Теперь крестьянин в госбюджет должен был платить только маленький поземельный налог, а остальные налоги крестьяне платили в местный бюджет (мирские и земские подати). Юридический смысл в решении об отмене выкупных платежей состоял в том, что по положениям реформы 1861 г. после завершения выкупных выплат земля переходила в собственность крестьян. Царь, простив крестьянам невыплаченный долг, фактически завершил выкупную операцию. Таким образом, вопрос о крестьянской земельной собственности и судьбе общины был поставлен на повестку дня уже в силу появления ноябрьского Манифеста. Важно отметить, что в Манифесте царь указывал и на путь решение аграрного вопроса: дать Крестьянскому поземельному банку возможность «успешнее помогать малоземельным крестьянам в расширении покупкою площади их землевладения, увеличив

---

<sup>1</sup> Тюкавкин В. Г. Всероссийское крестьянство и столыпинская аграрная реформа. М.: Памятники исторической мысли, 2001; Рогалина Н. Л. Власть и аграрные реформы в России XX века. М., 2010; Давыдов М. А. Очерки аграрной истории России в конце XIX – начале XX вв. М., 2003.

для сего средства банка и установив более льготные правила для выдачи ссуд». Царь подчеркнул, что «насущные нужды» крестьян должны быть удовлетворены «без всякой обиды для прочих землевладельцев», не нарушая «закона и прав других лиц» [1].

Правительство во главе с С. Ю. Витте стало активно готовить разные варианты проектов аграрных реформ. При этом С. Ю. Витте понимал, что Государственная дума, созыв которой планировался на весну 1906 г., будет требовать более радикального решения аграрного вопроса, чем предлагал упомянутый ноябрьский Манифест. В 1905 г. крестьяне в своих многочисленных наказах ясно говорили о желании переделить помещичью землю.

В начале января 1906 г. С. Ю. Витте представил царю проект, составленный Н. Н. Кутлером, главноуправляющим землеустройством и земледелием. Проект Н. Н. Кутлера предусматривал возможность принудительного отчуждения части частновладельческих земель за справедливое вознаграждение. Кутлеровский проект открывал путь к поиску компромисса с либералами и крестьянскими депутатами, которые должны были составить основную костяк депутатов в Думе. Николай II наложил резолюцию: «Частная собственность должна оставаться неприкосновенной». Н. Н. Кутлер был отправлен в отставку.

Таким образом, в январе 1906 г. был сделан принципиальный выбор курса аграрной реформы, в основе которого лежал принцип недопустимости принудительного отчуждения частновладельческих земель. Отсюда следовало, что аграрная реформа должна быть ограничена изменением принципов землепользования и переделом земли в рамках крестьянского сословия. Этот выбор предопределял общую стратегию проведения реформ: будут ли они проходить в ходе диалога правительства с большинством Думы или нет. То, какой выбор сделал Николай II, прекрасно понял С. Ю. Витте, которого считали тайным вдохновителем проекта Н. Н. Кутлера. Тем не менее кабинет С. Ю. Витте стал готовить проект аграрной реформы, соответствующий указанию царя. Речь шла о предоставлении крестьянам права выхода из общины, укрепления земли в личную собственность, возможности ее продажи и переселения части крестьян на новые земли за Урал. Уже 10 марта правительство С. Ю. Витте принимает положение, которое изменяет закон о переселении 1904 г. и серьезно стимулирует активное переселение крестьян.

В середине апреля, незадолго до созыва первой Думы, партийный состав которой был уже известен, С. Ю. Витте подал в отставку. Одной из причин отставки С. Ю. Витте назвал готовность ряда членов правительства и стоявшего за ними царя разогнать Думу в случае, если она не примет правительственный вариант решения аграрного вопроса.

Правительство возглавил И. Л. Горемыкин, сторонник разгона Думы. Вот в этот момент в столице и в правительстве появляется 44-летний саратовский губернатор П. А. Столыпин, который привлек внимание монарха своей решительностью при подавлении крестьянских бунтов в 1905 г. За день до открытия Думы, 26 апреля 1906 г., П. А. Столыпин становится министром внутренних дел в правительстве И. Л. Горемыкина.

С первых дней своей работы думцы обратились к монарху с просьбой провести ряд политических реформ и уменьшить земельный голод крестьян путем ликвидации казенных, удельных, монастырских земель и принудительного выкупа частновладельческих земель. Царь устами И. Л. Горемыкина ответил думцам решительным «Нет» [2].

Иными словами, царь вновь и очень четко подтверждает свою позицию в аграрном вопросе. Эта позиция предопределяет разгон первой Думы 8 июля, и в этот же день П. А. Столыпин, не пробыв и трех месяцев на посту министра, сменяет И. Л. Горемыкина. Назначение П. А. Столыпина на пост премьера было личным решением царя, который искал и нашел решительного, энергичного, не связанного с либеральными столичными кругами человека, обязанного головокружительной карьерой монаршей воле. П. А. Столыпин был избран как исполнитель стратегического курса, который определил сам царь. Премьеру было доверено определять лишь тактику проведения реформ. Следует отметить, что П. А. Столыпин искренне разделял позицию царя в аграрном вопросе. Тем не менее вопрос о том, какие цели субъективно преследовал П. А. Столыпин при проведении реформ, представляется важным, но вторичным. Первичным является вопрос о позиции царя.

По нашему мнению, заявленный правительством П. А. Столыпина комплекс мер (по решению аграрного, рабочего, национального вопросов, введению всеобщего начального образования и др.) наиболее правильно оценить как политику **консервативной модернизации страны**, которая укладывалась в русло *буржуазного пути развития России*. Воплощение заявленной программы действительно означало бы существенную модернизацию российского общества. И эта модернизация имела буржуазный характер, поскольку способствовала укреплению принципа частной собственности и частнокапиталистического уклада как ведущего уклада в экономике страны.

Консервативная предлагаемая модернизация являлась потому, что реформы были направлены:

- на сохранение монархии в качестве верховной самодержавной власти;
- защиту собственности и экономических интересов помещичьего дворянства как традиционной опоры трона и правящего сословия.

Обе задачи были поставлены царем, и обе имели обязательный характер. Начало решению первой задачи было положено самим царем. Как известно, в Манифесте от 17 октября 1905 г. царь обещал «установить, как незыблемое правило, чтобы никакой закон не мог воспринять силу без одобрения Государственной Думы». Однако за четыре дня до открытия Государственной думы I созыва 23 апреля 1906 г. выходит новая редакция Основных государственных законов, в которой сказано, что «Императору Всероссийскому принадлежит *Верховная Самодержавная власть*», что «*единственно по Его почину* Основные Государственные Законы могут подлежать пересмотру в Государственном Совете и Государственной Думе», что «Государь Император утверждает законы и *без Его утверждения никакой закон не может иметь своего совершения*» [3].

Таким образом, царь создал юридическую ситуацию, когда парламент был лишен возможности без согласия монарха проводить любые реформы. Вот такой политический строй был прописан в Основных законах, и П. А. Столыпину, который не принимал участия в подготовке этих законов, было поручено сохранить этот строй.

Основные законы, хотя и декларировали верховный характер власти монарха, тем не менее, не позволяли ему в правовом поле решать вторую задачу консервативной модернизации: не допустить принудительного раздела помещичьих земель.

Государственная дума I созыва отклонила правительственный проект аграрной реформы. Царь, действуя еще в рамках закона, распустил в июле первую Думу и, не дожидаясь начала работы второй Думы, указом от 9 ноября 1906 г. предоставил крестьянам

права выхода из общины, закрепления своей наделной земли в личную собственность, выделения ее единым массивом (в отруб или хутор), продажи земли на определенных условиях. Когда вторая Дума отказалась превратить указ в закон, царь 3 июня 1907 г. разогнал и ее. И одновременно он самочинно изменил избирательное законодательство, совершив то, что современники называли *третьеиюньским государственным переворотом*. Новый избирательный закон обеспечил преобладание в Думе крупных собственников, готовых принять правительственную программу реформ. Закономерность третьеиюньского переворота вытекала из сущности аграрного курса, принятого царем: в условиях России того времени нельзя было провести в рамках демократических институтов аграрную реформу, которая бы не затрагивала помещичьего землевладения.

Однако создание консервативной Думы само по себе не создавало благоприятных условий для проведения столыпинских реформ. Правительство смогло разогнать Думу первых двух созывов и подавить аграрные «беспорядки» к 1907 г. Однако *оно не могло изменить в короткий срок вековой крестьянский взгляд на то, что хорошо, а что плохо в земельном вопросе*. Суть позиции крестьян была хорошо всем известна: крестьянин всегда считал несправедливым захват помещиками крестьянских земель, выступал против купли-продажи земли, полагая, что земля должна быть распределена по уравнильно-трудовой норме между теми, кто ее обрабатывает. Как уже отмечалось, в условиях первой русской революции крестьянин высказал свои требования в многочисленных наказах, принятых сельскими сходами. Этот крестьянский взгляд или менталитет русского крестьянина был главным фактором, который определял и ограничивал *потенциал* столыпинской аграрной реформы в ее двух основных аспектах: сохранить помещичье землевладение и сделать из крестьян частных собственников. По своей сути столыпинская реформа была попыткой силового изменения менталитета крестьян.

Имела ли такая реформа объективные шансы на успех?

Если говорить о землях помещиков, то история показала, что с 1907 по 1917 гг. в России не было крупных крестьянских выступлений с целью захвата помещичьих земель. Иными словами, при благоприятной политической и экономической ситуации правительство могло держать крестьян под контролем. Однако при неблагоприятных условиях положение радикально изменилось: в 1917 г. крестьянство, осознав слабость власти, начало захват помещичьих земель.

Успех крестьянской реформы также критически зависел от наличия или отсутствия благоприятных политических и экономических условий. Как известно, крестьянская переделная община была многовековым институтом, возникшим под воздействием ряда объективных факторов (климатических, географических, демографических, фискальных и др.)<sup>1</sup>. В целом ряде случаев воздействие этих факторов было ослаблено или устранено. И в этих случаях реформа Столыпина имела успех. Однако для большей части крестьянства общинная форма землепользования все еще оставалась привлекательной. Поэтому попытка ее разрушения рассматривалась как насилие: 3/4 крестьян, подавших заявление о выходе, не получили согласия сельских сходов. Общие итоги реформы известны: за все годы

---

<sup>1</sup> Причины и генезис общины прекрасно показал акад. Л. В. Милонов в фундаментальной монографии «Великорусский пахарь и особенности российского исторического процесса». М.: РОССПЭН, 1998.



реформ на отруб и хутора вышли только 10 % крестьян, из них на хутора – треть; остальные из тех 22,1 %, кто укрепил земли в личную собственность, практически остались в рамках общины [4]. Непосредственным результатом реформы было обострение противоречий в самой деревне между бедными и богатыми, сторонниками и противниками общины. Пока государственная власть была крепка, эти противоречия, как и в случае с помещиками, носили латентный характер. Однако в 1917 г. в условиях новой революции большинство крестьян сразу потребовало передела *всех* земель по уравнильно-трудовой норме и самочинно приступило к такому переделу.

Таким образом, говоря о потенциале реформы, можно сделать следующий вывод: избранная Николаем II стратегия консервативной модернизации в процессе ее проведения не ослабляла, а напротив, усиливала социально-политические противоречия в российском обществе. В принципе аграрная реформа могла их ослабить в неблизком будущем при наличии благоприятных внутренних и внешних условий. П. А. Столыпин это прекрасно понимал, и именно поэтому говорил о том, что ему нужно 20 лет мира. Прекрасно понимал это и Николай II, который явно боялся назревавшей мировой войны. Однако царь не сумел преодолеть логику развития мирового конфликта, и начавшаяся мировая война закрыла возможность сохранения благоприятных условий для консервативной модернизации. Иными словами, столыпинские реформы не были заранее обречены на провал. Однако успех внутренней модернизации критически зависел от курса внешней политики. Этот курс определял Николай II и в период премьерства П. А. Столыпина, и после его смерти. Отсюда следует, что именно царь был и подлинным автором, и могильщиком столыпинских реформ.

Интересен вопрос: были ли в 1906 г. у Николая II иные варианты действий? В принципе, были. Коренные национальные интересы России не требовали ее участия в Первой мировой войне. Царь мог уклониться от войны, что сохраняло возможность дальнейшего проведения политики консервативной модернизации. Он мог также принять линию Витте–Кутлера и осуществить аграрную реформу, пожертвовав по крайней мере частью интересов крупных земельных собственников. С. Ю. Витте прямо писал о том, что именно так поступил Александр II в 1861 г. Такие шаги открывали возможность получить поддержку крестьян и, используя укорененность идеологии «наивного монархизма» как составляющей части крестьянского менталитета, сохранить монархию на срок, достаточно длительный для того, чтобы обеспечить эволюционный путь развития России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полное собрание законов. СПб.: Гос. тип., 1908. Собр. III. Т. 25. № 26871.
2. Государственная дума: стеногр. отчеты. СПб.: Гос. тип., 1906. Созыв I. Сессия I. Т. 1. С. 321–323.
3. Российское законодательство X–XX вв. М.: Юр. лит-ра, 1994. Т. 9. С. 43–51.
4. Россия. 1913 год. Статистико-документальный справочник. СПб., 1995. С. 64–66.

*V. V. Kalashnikov*

*P. A. STOLYPIN'S AGRARIAN REFORMS: ESSENCE, POTENTIAL, ALTERNATIVES*

*The author analyses the agrarian reforms of P.A. Stolypin as a case of conservative modernization of the Russian society at the beginnings of XX century. The essence, potential force and alternatives of the reforms are considered.*

**P. A. Stolypin, agrarian reforms, Russia, conservative modernization, essence, potential, alternatives**

## РЕФОРМЫ П. А. СТОЛЫПИНА И СОВРЕМЕННОСТЬ

*Анализируются проводившиеся правительством П. А. Столыпина реформы. Значительное место уделено рассмотрению аграрных преобразований. Раскрываются причины провала большинства столыпинских реформ, а также делается вывод об ограниченной возможности использования реформаторского опыта П. А. Столыпина в современных условиях.*

### Российская империя, реформы, правительство, аграрная реформа, хутор, национальная политика

Прошлый 2011 и нынешний 2012 гг. ознаменованы памятными датами, связанными с известным государственным деятелем Царской России, председателем Совета министров Российской империи в период с 1906 по 1911 гг. Петром Аркадьевичем Столыпиным (1862–1911). В сентябре прошлого года исполнилось ровно 100 лет со дня его трагической гибели (5 сентября по ст. ст.), а в апреле нынешнего года исполняется 150 лет со дня его рождения (2 апреля по ст. ст.).

В последнее время власти Российской Федерации проявляют неподдельный интерес к деятельности известного реформатора, заявляют о том, что его наследие крайне востребовано в нынешнее время. Так, по сообщению сайта Правительства РФ, 13 июля прошлого года Владимир Путин, тогда еще Председатель Правительства РФ, провел заседание оргкомитета по празднованию 150-летия со дня рождения П. А. Столыпина<sup>1</sup>. Владимир Владимирович предложил членам Правительства вложить часть личных средств в строительство памятника П. А. Столыпину. По его словам, П. А. Столыпину удалось сформировать в России основы социальной политики, произвести глубокое переустройство государственных механизмов и государственного аппарата, обеспечить впечатляющий рост промышленности.

По мнению В. В. Путина, «место и роль Петра Аркадьевича в истории нашей страны огромные, и вместе с тем его деятельность и несомненные заслуги долгие десятилетия были несправедливо забыты, недооценены и современниками, и потомками. Петр Аркадьевич прошел большой путь на государственном поприще и встал во главе правительства России в сложное, без преувеличения – драматическое, время – время политического и общественного раскола».

«Убежден, формируемая программа, посвященная юбилею Петра Аркадьевича Столыпина, должна максимально раскрыть все грани его профессиональной, общественной и политической деятельности, чтобы о них больше узнали в российском обществе и, прежде всего, конечно, больше узнала молодежь, которой, безусловно, нужны хорошие, достойные примеры служения стране и людям», – считает Владимир Путин.

Отметим, что подобные заявления о значении столыпинских реформ звучали из уст Владимира Путина за последнее время не раз. На организацию торжеств и памятных мероприятий в честь П. А. Столыпина выделены огромные средства. В частности, в рамках про-

<sup>1</sup> Интернет-портал Правительства Российской Федерации. 13 июля 2011 г. Режим доступа: <http://premier.gov.ru/-events/news/15880/>.

ведения памятных мероприятий, посвященных П. А. Столыпину, в московском издательстве РОССПЭН недавно вышла в свет объемная, на качественной мелованной бумаге и богато иллюстрированная энциклопедия, посвященная жизни и деятельности реформатора. Во вступительной статье к энциклопедии д-р ист. наук, проф. В. В. Шелохаев утверждает, что «актуальным представляется решение П. А. Столыпиным позитивной задачи – реализации масштабной программы построения новой России». По мнению историка, реформатор при проведении своих преобразований учитывал мировой опыт, но, тем не менее, «считал главным и определяющим исторический опыт российской государственности, социокультурные традиции русского народа», публично высказываясь о своей приверженности «русским историческим началам», «русскому национальному пути» [1, с. 10].

С другой стороны, отметим, что представители различных политических течений современной России дают политике П. А. Столыпина самые разнообразные оценки, которые варьируются от восторженных до крайне негативных. В связи с актуализацией данной проблемы рассмотрим вкратце сущность реформ П. А. Столыпина и дадим им собственную оценку.

**Политические репрессии.** Понимая необходимость и неизбежность реформ, П. А. Столыпин придерживался принципа: «Сначала успокоение, потом реформы». Поэтому и после подавления революции 1905–1907 гг. система репрессивно-карательных мер продолжала совершенствоваться.

Судопроизводство по политическим делам не отличалось гуманностью. Создавались так называемые военно-окружные суды, которые в судебной системе России пореформенного периода являлись вышестоящей инстанцией по отношению к полковым судам. В их ведении находились все уголовные дела (кроме тех, что рассматривались полковыми судами) и проверка обоснованности апелляционных жалоб на приговоры нижестоящих судов. Суды состояли из председателя, двух постоянных членов и назначавшихся на четыре месяца временных членов из числа офицеров, служивших в данном округе. Состав суда утверждался командующими военных округов. В каждом военном округе существовал один военно-окружной суд.

Несмотря на предоставление обвиняемым адвокатов и соблюдение юридических формальностей, военно-окружные суды по жестокости приговоров мало отличались от военно-полевых судов революционного времени. По некоторым данным только в 1907–1909 гг. военными судами было вынесено более 2,5 тыс. смертных приговоров. Остальные осужденные отправлялись в тюрьму, на каторгу (всего около 23 тыс. человек). Около 39 тыс. человек были отправлены в ссылку административными решениями. Эти меры П. А. Столыпин считал чрезвычайными, необходимыми для спасения государственности и неизбежными для выполнения программы реформирования.

Активно боролся премьер и со своими легальными противниками. Используя законодательство революционного времени, правительство закрывало или приостанавливало деятельность оппозиционных органов печати. Жесткие репрессивные мероприятия и общий спад революционного движения создали благоприятные условия для проведения П. А. Столыпиным задуманной им программы реформ.

**Аграрная реформа.** Первым шагом на пути аграрного реформирования стал царский Указ от 9 ноября 1906 г., который предоставлял крестьянам право на выход из общины и закрепление в личную собственность причитающейся им общинной земли [2, с. 85–86]. Для успешной реализации реформы необходимо было разделить общинные владения

на самостоятельные хозяйства – отрубы и хутора. С этой целью 15 ноября 1908 г. были изданы «Временные правила о выдаче наделной земли к одним местам». В 1910 г. указ от 9 ноября 1906 г., ставший, наконец, законом, был дополнен Положением, предусматривавшим обязательность ликвидации общины там, где не проходили переделы земли с 1863 г. [3]. Аграрная политика П. А. Столыпина предполагала также массовое переселение крестьян за Урал с предоставлением им на просторах Сибири земли.

За 1907–1915 гг. заявления о выходе из общины подали 34 % домохозяев. Оформили документы, т. е. формально вышли из общины около 2,5 млн (28 %) домохозяев из общего числа в 9,2 млн дворов. Фактически укрепили землю в частную собственность 22 % – примерно 1,9 млн домохозяев, из них 1,2 млн вскоре продали свою землю. Большая часть вышедших из общины крестьян была представлена беднотой и зажиточными хозяевами. Первые, получив землю в собственность, чаще всего ее продавали, а сами уходили в города или переселялись на новые места. Вторые, а их было около 10 % от общего числа крестьянских хозяйств, организовывали свои фермерские хозяйства.

Покупателями проданной земли часто оказывались зажиточные крестьяне-общинники, а также сами общины, возвращавшие земли в общее пользование. Отрубные хозяйства прижились в основном в Заволжье, на Северном Кавказе, в губерниях Северного Причерноморья, а хутора – в западных и северо-западных губерниях.

**Политические реформы.** Одной из важных акций правительства П. А. Столыпина был роспуск 3 июня 1907 г. II Государственной думы, большинство депутатов которой были против аграрной политики П. А. Столыпина. Одновременно с манифестом императора о роспуске Думы в стране вводился *новый избирательный закон*, урезавший избирательные права низших социальных слоев населения. Так, благодаря Положению о выборах в Государственную думу от 3 июня 1907 г. резко изменилось соотношение между куриями выборщиков в пользу помещиков и крупной буржуазии (1 % населения страны получал 2/3 депутатских мест). Выборы в новую Думу были не всеобщими, не равными и не прямыми [4]. По сути дела, новый избирательный закон явился следствием невозможности проведения монархического реформирования в левой по составу Думе.

**Рабочий вопрос.** В июне 1908 г. в Думу были вынесены 10 законопроектов, предусматривавших социальное страхование рабочих; создание сберегательных касс; регулирование правил найма рабочих и рабочего времени; меры поощрения строительства дешевых жилых домов и т. п.

Однако проекты лежали без движения многие годы. Только в 1912 г., когда начался новый подъем общественного движения, Дума приняла закон о государственном страховании от несчастных случаев и по болезни (распространялся только на 15 % рабочих). Было принято и решение о создании больничных касс для рабочих. Таким образом, столыпинская программа в рабочем вопросе не была осуществлена.

**Реформы в системе образования.** Помимо попыток решения рабочего вопроса важное место в политике столыпинских реформ занимали *реформы в системе образования*. В 1909 г. в Думу поступил проект о введении в 10-летний срок в России всеобщего начального обучения. Согласно ему все дети, независимо от пола и сословия, могли «по достижении школьного возраста пройти полный круг обучения в правильно организованной школе». В связи с предполагаемой реформой высшего образования был разработан

новый Университетский устав, предоставлявший высшей школе широкую автономию. С системой образования П. А. Столыпин тесно связывал и развитие научных знаний. В годы реформ активно финансировались научные исследования, экспедиции, реставрационные работы, издание научной литературы, развитие театра и кинематографа. Также в этот период было подготовлено «Положение об охране древностей»; принято решение о создании Пушкинского дома в Санкт-Петербурге; поддержаны проекты по организации музеев в губерниях. Но окончательного законодательного решения по школьным проектам так и не было вынесено. Не реализовались и планы П. А. Столыпина о введении принципа непрерывного образования с преемственностью различных ступеней.

**Национальная политика.** Осуществлялась под лозунгом «Россия для русских» и была направлена на сохранение единой, неделимой России. Избирательный закон 3 июня 1907 г. сократил представительство в Государственной думе Польши, Кавказа, а инородцы Средней Азии, Казахстана и Сибири вообще были лишены избирательных прав. Внесенные в Думу еще в 1906 г. законопроекты об использовании национальных языков в начальной школе и о либерализации системы вероисповедания после поражения революции были отозваны обратно.

Ряд законопроектов и циркуляров, подготовленных П. А. Столыпиным, снимали различные национальные ограничения, в том числе и относительно еврейского населения. П. А. Столыпин понимал, что от подобных мер «России будет не ущерб, а благо».

Особенно острым был для П. А. Столыпина вопрос о положении Великого княжества Финляндского. Финляндия стремилась расширить свою автономию, а П. А. Столыпин настаивал на примате общероссийских законов и дважды распускал финский парламент. В 1910 г. был принят закон, ограничивший автономию Финляндии и исключивший из сферы финляндского законодательства вопросы налогообложения; воинской повинности; защиты прав русских подданных, проживающих в Финляндии, а также суд, охрану государственного порядка и уголовное законодательство. Сейм лишился права принимать законы о школьном образовании, охране порядка, печати и др. Готовилась отмена русско-финляндской таможенной границы.

Усилилась русификаторская политика и на территории Царства Польского. Был закрыт ряд польских культурно-просветительских обществ и польскоязычных школ, в городах были созданы муниципальные учреждения с преобладанием русских служащих. В 1909 г. в Думу был внесен законопроект о выделении из Царства Польского Холмской губернии. Ее крестьянское население состояло в основном из украинцев, а помещики – из поляков и русских. Фактически проект был рассчитан на укрепление позиций русского дворянства, что еще больше обострило межнациональные отношения в Польше. Усложнил ситуацию и принятый в 1912 г. закон о создании земств в западных губерниях, ограничивавший права польского населения в самоуправлении.

Отметим, что антирусские настроения нарастали и в других регионах России. В Средней Азии и на Кавказе росло недовольство конфискацией земель для русских переселенцев. Возникали новые мусульманские организации, усилилась панисламистская пропаганда, связанная с политикой насильственной «христианизации мусульман». Тюркские меньшинства на территории Азербайджана и татарское национально-либеральное течение в Крыму выступали за расширение прав этих народов, что было неприемлемо для царского правительства, считавшего мусульманские народы слаборазвитыми.

Политика национализма, основанная на идее главенства русской нации, не способствовала разрешению национального вопроса. Более того, проводимые в этой области мероприятия настроили против П. А. Столыпина многие национальные меньшинства.

Правительство П. А. Столыпина пыталось осуществить и другие преобразования в разных сферах государственной политики, однако дальше проектов дело не шло.

**Итоги реформ.** Оценивая реформы П. А. Столыпина в целом, отметим, что, безусловно, они задумывались им как способ укрепления существовавшего тогда государственного строя, т. е. монархии. Однако далеко не все его преобразования объективно способствовали этому процессу.

Аграрная реформа с ее разрушением общины фактически привела к тому, что крестьянство, основная масса русского населения, традиционно питавшая верноподданнические чувства, в большинстве своем не приняло правительственные начинания, становясь постепенно во все большую оппозицию по отношению к власти.

Отношение широких крестьянских масс к аграрным преобразованиям П. А. Столыпина наглядно демонстрирует найденный нами в архивном фонде редакции правомонархической газеты «Русское знамя» документ – открытое письмо группы крестьян Екатеринославской губернии П. А. Столыпину, в котором сельские жители требуют «освободить томящихся в тюрьмах отцов, мужей, братьев наших, единственная вина которых заключается лишь в том, что они отдали преимущество землепользованию общинному перед отрубным, которое насильственно вводится по распоряжению Вашего Высокопревосходительства и за которое не только мужья, отцы наши, но мы и невинные младенцы наши во всякое время дня и ночи избиваются в домах наших же» [5].

Реформа избирательного права 1907 г., хотя и обеспечила в III и IV Думах правооктябристское большинство, тем не менее, не смогла устранить опасность формирования эффективной думской оппозиции, направленной против самодержавия. Такая оппозиция сформировалась уже после гибели П. А. Столыпина, на фоне трудностей Первой мировой войны, и сыграла очень важную, если не ключевую роль в обеспечении победы Февральской революции, покончившей с самодержавной властью в России.

Русификаторская политика П. А. Столыпина на национальных окраинах вызвала яростное сопротивление со стороны национальных меньшинств и объективно способствовала нарастанию сепаратистских настроений, которые немедленно проявились в полной мере после падения монархии.

Прочие же реформы вообще, как в силу малого количества времени, отпущенного историей на них, так и в силу мощного сопротивления, с одной стороны, либералов, а с другой – правых, не были реализованы и остались только на бумаге.

Почему большинство реформ П. А. Столыпина не удалось? Фактически реформатор пытался совместить вещи несовместимые – монархическую идею с идеями либерализма. В настоящее время среди историков русского консерватизма ведутся споры, кем же все-таки был Петр Аркадьевич – консервативным либералом или либеральным консерватором?<sup>1</sup> Вне зависимости от постановки проблемы ясно одно: П. А. Столыпин пытался провести

---

<sup>1</sup> Клуб исследователей русского консерватизма. Режим доступа: [http://vk.com/topic-603929\\_13139465](http://vk.com/topic-603929_13139465).

либеральные реформы в России при сохранении самодержавной власти. Отметим, что все реформы, заявленные П. А. Столыпиным (аграрная, политическая, школьная, земская и др.), объективно обладали потенциалом, который должен был привести к господству буржуазных отношений в российском обществе. А в рамках такого общества, в случае последовательного проведения столыпинских реформ, самодержавию просто не оставалось бы места: монархия могла претендовать лишь на роль традиционного института, в рамках которого монархи «царствуют, но не правят». Отсюда становится ясно, почему так яростно сопротивлялись столыпинским преобразованиям правоконсервативные круги, боявшиеся ликвидации самодержавия.

Какие идеи реформ П. А. Столыпина могла бы использовать нынешняя власть в современных условиях для ускорения развития страны и преодоления отсталости? На наш взгляд, таковых, за редким исключением, нет. Так, весьма спорной со всех точек зрения представляется, пожалуй, наиболее известная и самая главная реформа П. А. Столыпина – аграрная. Проблема состоит в том, что реформатор не учитывал особенности менталитета русского народа, который складывался веками, – коллективизм, общинность, соборность. Метод ведения индивидуальных частных хозяйств по западному образцу, который предлагал повсеместно насадить П. А. Столыпин, не мог прижиться на русской почве, что, кстати, мы воочию наблюдаем в наше время, когда за последние двадцать лет были разрушены своего рода «общинные структуры» советского времени – колхозы, а индивидуальное фермерское хозяйство, за редкими исключениями, у нас не прижилось. В итоге современный русский сельский житель, как правило, либо деградирует, спивается, либо перестает заниматься сельскохозяйственной деятельностью, а все мы активно потребляем импортную сельхозпродукцию.

Единственным рациональным зерном в аграрной политике П. А. Столыпина представляется его программа по переселению части крестьян в Сибирь и на Дальний Восток. Сейчас, когда население отдаленных регионов России стремительно уменьшается, необходимы срочные действенные меры, стимулирующие привлечение в Сибирь и на Дальний Восток граждан России. Иначе мы рискуем вообще потерять эти богатые природными ресурсами необъятные территории.

Примерно то же самое можно сказать и о русификаторской политике П. А. Столыпина. На наш взгляд, использование ее принципов в современных условиях может привести только к ответной реакции – усилению националистических и сепаратистских течений в регионах с компактным проживанием нерусского населения, что уже в итоге может угрожать единству страны.

Если же говорить о решении рабочего вопроса, а также о реформе системы народного образования, то, как нам представляется, куда более ценным в этой связи является советский опыт, когда жизнь рабочего, а также школа были поставлены на действительно высокий уровень не только по сравнению с Царской Россией, но и со многими «цивилизованными» странами Запада. Однако нынешние российские власти предпочитают вообще ничего не говорить о советском опыте реформирования, предпочитают замалчивать очевидные вещи.

Реформа избирательного права в столыпинском выражении – вообще, по сути дела, есть не реформа, а контрреформа, так как она существенно ограничивала избирательные возможности значительной части населения России, и использование этой идеи П. А. Столыпина в современных условиях вообще представляется антиконституционным и абсурдным шагом.

Хотелось бы в заключение отметить авторитетное мнение д-ра ист. наук, проф. И. Я. Фроянова, высказанное им в интервью информагентству «Русская народная линия». Видный ученый считает, что нет ничего удивительного в том, что нынешняя власть поднимает «на щит» реформы П. А. Столыпина. «Конечно, сегодняшней власти тоже нужно опереться на какие-то исторические явления прошлого, чтобы выглядеть благопристойно. Вот и выискивает точки опоры. И среди этих искусственно извлеченных точек опоры и значится Столыпин», – полагает И. Я. Фроянов<sup>1</sup>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петр Аркадьевич Столыпин: энциклопедия / Отв. ред. В. В. Шелохаев. М.: РОССПЭН, 2011.
2. Еропкин А. В. П. А. Столыпин и указ 9 ноября // Правда Столыпина. Саратов: Соотечественник, 1999.
3. Столыпин П. А. Речь о крестьянской семейной собственности, произнесенная в Государственном совете 26 марта 1910 года // Нам нужна великая Россия. М.: Молодая гвардия, 1991.
4. Положение о выборах в Государственную Думу // Свод законов Российской Империи. СПб., 1908. Т. 1, ч. 2.
5. Российский государственный исторический архив (РГИА). ф. 786, оп. 1, д. 1, л. 42.

*D. I. Stogov*

*P. A. STOLYPIN'S REFORMS AND MODERNITY*

*The article is devoted to analysis of P. A. Stolypin's government reforms. Considerable place is spared to examination of agrarian transformations. The reasons of majority reform's failure are exposed in the article. The author conclude that the Stolypin's reforms are not been largely used in contemporary conditions.*

**Russian Empire, reforms, government, agrarian reform, farmstead, national politics**

---

<sup>1</sup> Великан Сталин и пигмей Столыпин. Известный историк Игорь Фроянов о десталинизации и столыпинизации России. Режим доступа: [http://ruskline.ru/news\\_rl/2011/07/14/velikan\\_stalin\\_i\\_pigmej\\_stolypin/](http://ruskline.ru/news_rl/2011/07/14/velikan_stalin_i_pigmej_stolypin/).



## Сведения об авторах

*Абрамкин Сергей Евгеньевич*

Аспирант кафедры автоматике и процессов управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 776-71-24. E-mail: abrsergey@yandex.ru.

*Андреев Леонид Евгеньевич*

Бакалавр техники и технологии, студент магистратуры кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (904) 632-55-04. E-mail: l.andreev90@gmail.com.

*Антропова Мария Андреевна*

Аспирантка кафедры эргономики и инженерной психологии, факультет психологии Санкт-Петербургского государственного университета.

Тел.: +7 (921) 311-44-31. E-mail: maria.antropova@gmail.com.

*Ануфриев Александр Сергеевич*

Инженер Департамента электропривода ООО «НПФ “Ракурс”», аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ.

E-mail: anufriev@rakurs.com.

*Баранов Анатолий Александрович*

Аспирант кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (904) 605-82-58. E-mail: an.a.baranov@gmail.com.

*Барченко Владимир Тимофеевич*

Доцент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

E-mail: vtbarchenko@yandex.ru.

*Васильев Алексей Юрьевич*

Аспирант кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (950) 041-38-53. E-mail: orion@pochta.com.

*Гайворонский Дмитрий Вячеславович*

Доцент кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (921) 924-23-13. E-mail: dvgaivoronschi@rambler.ru.

*Грубо Елена Олеговна*

Инженер по метрологии СПбГЭТУ.

E-mail: helen.grubo@Gmail.com.

*Гуськова Марина Владимировна*

Заместитель начальника Управления лицензирования, аккредитации, признания и подтверждения документов Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (967) 180-93-58. E-mail: 22707@bk.ru.

*Дмитриева Ольга Андреевна*

Студентка кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 644-21-06. E-mail: verbena28@gmail.com.

*Душин Сергей Евгеньевич*

Профессор кафедры автоматике и процессов управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (921) 970-46-31. E-mail: dushins@yandex.ru.

*Жукова Наталья Александровна*

Ассистент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ,  
канд. техн. наук.

Тел.: (812) 234-25-03. E-mail: nzhukova@nicetu.spb.ru.

*Задорожный Владимир Николаевич*

Доцент ГОУ ВПО «Омский государственный технический университет», канд. техн.  
наук.

E-mail: zwn@yandex.ru.

*Кадиев Исмаил Гаджиевич*

Зам. декана ФЭМ по научной работе, доцент кафедры инновационного менеджмента  
СПбГЭТУ, канд. экон. наук.

Тел.: +7 (906) 253-84-07. E-mail: ismmut@gmail.com.

*Калашников Владимир Валерьянович*

Профессор кафедры истории культуры, государства и права СПбГЭТУ, д-р ист. наук.

Тел.: +7 (921) 982-98-20. E-mail: vvk2@mail.ru.

*Карпова Светлана Сергеевна*

Аспирантка кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-31-64. E-mail: SSKarpova@list.ru.

*Кирилин Павел Сергеевич*

Студент кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (952) 379-11-07. E-mail: himerakir@yandex.ru.

*Королев Павел Геннадьевич*

Доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий СПбГЭТУ,  
канд. техн. наук.

Тел.: (812) 234-93-93. E-mail: pgkorolev@gmail.com.

*Крупович Николай Викторович*

Аспирант кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ.

E-mail: knv85@inbox.ru.

*Кутузов Олег Иванович*

Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управле-  
ния СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

E-mail: Kutuzov-oleg@mail.ru.

*Лозак Александр Александрович*

Студент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 346-45-18. E-mail: maxel8@gmail.com.

*Лячек Юлий Теодосович*

Профессор кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ, канд.  
техн. наук, доцент, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

Тел.: +7 (905) 256-30-93. E-mail: ytlyachek@mail.ru.

*Мардас Дмитрий Анатольевич*

Аспирант кафедры инновационного менеджмента СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 335-50-51. E-mail: denmarru@mail.ru.

*Миронов Сергей Эльмарович*

Доцент кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (960) 289-57-30. E-mail: semironovspb@yandex.ru.

*Наседкин Анатолий Викторович*

Старший преподаватель кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 944-26-99. E-mail: avn9321@mail.ru.

*Немирко Анатолий Павлович*

Профессор кафедры биотехнических систем СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (921) 744-42-15. E-mail: apn-bs@yandex.ru.

*Новиков Владислав Александрович*

Профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

E-mail: vlnov@list.ru.

*Паврос Кирилл Сергеевич*

Старший преподаватель кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 346-45-18. E-mail: qnet@inbox.ru.

*Саламонова Ирина Сергеевна*

Аспирантка кафедры биотехнических систем СПбГЭТУ, магистр техники и технологии по направлению «Биомедицинская инженерия».

Тел.: +7 (921) 633-29-88. E-mail: i.salamonova@yandex.ru.

*Синьков Алексей Олегович*

Магистрант кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (960) 273-19-59. E-mail: ao.sinkov@gmail.com.

*Стогов Дмитрий Игоревич*

Ассистент кафедры истории культуры, государства и права СПбГЭТУ, канд. ист. наук.

Тел.: +7 (911) 245-06-71. E-mail: bel-grigorij@yandex.ru.

*Теплякова Александра Викторовна*

Инженер кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: (812) 346-45-18. E-mail: smaest@mail.ru.

*Тихонов Эдуард Прокофьевич*

Профессор кафедры биотехнических систем СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-31-12. E-mail: bme@tltegh.ru.

*Удовиченко Сергей Юрьевич*

Заместитель директора НИИ прикладных наук Тюменского государственного университета.

E-mail: udosu@mail.ru.

*Утушкина Анна Владимировна*

Студентка кафедры информационно-измерительных систем и технологий СПбГЭТУ.

E-mail: anjutka\_stud@mail.ru.

*Федяев Артур Александрович*

Ассистент кафедры технологии лесопиления и сушки древесины СПбГЛТУ им. С. М. Кирова.

Тел.: +7 (911) 119-04-36. E-mail: [art-spb@newmail.ru](mailto:art-spb@newmail.ru).

*Червинская Ксения Ральфовна*

Доктор психологических наук, доцент кафедры эргономики и инженерной психологии факультета психологии СПбГУ.

*Чубинский Анатолий Николаевич*

Зав. кафедрой технологии лесопиления и сушки древесины СПбГЛТУ им. С. М. Кирова, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 598-08-24. E-mail: [a.n.chubinsky@gmail.com](mailto:a.n.chubinsky@gmail.com).

*Шейнман Илья Львович*

Доцент кафедры физики СПбГЭТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент.

Тел.: +7 (911) 998-82-46. E-mail: [isheinman@yandex.ru](mailto:isheinman@yandex.ru).

*Штанько Сергей Владимирович*

Доцент кафедры космических радиотехнических систем ВКА им. А. Ф. Можайского.

Тел.: +7 (911) 944-84-11. E-mail: [craft2001@mail.ru](mailto:craft2001@mail.ru).

*Ярыгин Михаил Александрович*

Магистрант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ.

E-mail: [mikhail.yaryguin@gmail.com](mailto:mikhail.yaryguin@gmail.com).

## Правила представления рукописей авторами

В редакционный совет журнала «Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»» необходимо представить:

- файлы на дискете либо CD (в отдельных случаях по предварительному согласованию с редсоветом допустима передача материалов по электронной почте):
  - рукопись статьи;
  - сведения об авторе(ах);
- документы на листах формата А4 (1 экз.):
  - рукопись статьи (статья должна быть объемом 4–8 маш. с., обзорная статья – до 16 маш. с.);
  - сведения об авторе(ах);
  - рекомендация кафедры с указанием наименования тематического раздела, в котором предполагается опубликование материала;
  - экспертное заключение о возможности опубликования материала в открытой печати;
  - сопроводительное письмо (только для авторов, не работающих (не обучающихся) в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

*Сведения об авторах должны содержать:*

1. Фамилию, имя, отчество (полностью) автора.
2. Основное место работы.
3. Должность.
4. Ученую степень, ученое звание.
5. Контактный телефон, адрес электронной почты.

Все сведения печатаются в строку (без пунктов) на русском и английском языках.

### *Правила оформления текста статьи*

Статья должна быть тщательно отредактирована, содержать признаки научной публикации:

- текстовый редактор Microsoft Word версии не ниже 97;
- формат бумаги А4;
- параметры страницы: поля – верхнее 2.5 см, левое и нижнее 2.5 см, правое 2 см, верхний колонтитул 2 см, нижний колонтитул 2 см;
- основной текст статьи: шрифт «Times New Roman» 12 pt; выравнивание по ширине; первая строка с абзацным отступом 1 см; межстрочный интервал «Множитель 1.2».

На первой странице указывается индекс УДК (в левом верхнем углу; шрифт «Times New Roman» 14 pt; межстрочный интервал одинарный); далее даются инициалы и фамилии авторов, затем название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на русском языке. Инициалы и фамилии авторов, название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на английском языке размещаются в конце публикации после библиографического списка.

*Перечень авторов* разделен запятыми, инициалы перед фамилиями (шрифт «Times New Roman» 12 pt, жирный курсив; выравнивание по правому краю, абзацный отступ справа 1 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем и после него 6 pt, межстрочный интервал одинарный).

*Название статьи* набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 14 pt; жирный; выравнивание по левому краю; отступы слева и справа 1 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 6 pt, после него – 12 pt; межстрочный интервал одинарный).

*Аннотация* содержит 3–7 строк, характеризующих содержание статьи (шрифт «Times New Roman» 10 pt, курсив; выравнивание по ширине; отступы: слева и справа 1.5 см, первая строка 0.75 см; интервалы перед абзацем и после него 0 pt, межстрочный интервал одинарный).

*Ключевые слова* состоят из 3–10 слов и словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми, в конце их перечисления точка не ставится; шрифт «Times New Roman» 10 pt, жирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 6 pt, после него 9 pt; межстрочный интервал одинарный).

Далее следует текст статьи.

После основного текста следует библиографический список, который включает:

➤ *заголовок* «Список литературы» набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 12 pt; выравнивание по центру; интервалы: перед абзацем 6 pt, после него 6 pt; межстрочный интервал «Одинарный»);

➤ *библиографическое описание источника* с порядковым номером ссылки на него по тексту, начиная с первого, выполненное по ГОСТ 7.3–2003. Библиографическое описание документа. Введ. 01.07.2004 / Госкомстандарт. М., 2004 (отдельным абзацем; шрифт «Times New Roman» 10 pt; первая строка с абзацным отступом 0.7 см; выравнивание по ширине; межстрочный интервал одинарный).

Библиографический список не должен превышать 10 (для обзорных заказных статей – 20) наименований: приводятся только источники, на которые есть ссылки в тексте (ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются).

Для создания *формул* используются встроенные возможности Word и (или) редактора MathType. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: «полный» 12 pt, «подстрочный» 10 pt, «под-подстрочный» 8 pt, «символ» 14 pt, «подсимвол» 12 pt; стили: текст, функция, число – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив; интервалы: перед формулой 6 pt, после нее 6 pt.

На каждый рисунок и таблицу в тексте статьи необходимо дать ссылку. Каждый рисунок и таблица должны быть пронумерованы (напр.: Рис. 1, Табл. 3).

Текст в *таблицах* печатается через 1 интервал, шрифт «Times New Roman»; основной текст 10 pt, индексы 8 pt. Нумерационный заголовок содержит слово «Таблица» и ее номер арабскими цифрами (без знака номера перед ними и без точки на конце); выравнивается по правому краю таблицы и выделяется светлым курсивом; интервалы: перед таблице 4 pt, после нее 4 pt.

Рисунки цифрового формата (в электронном виде) создаются средствами Word или другими программами в черно-белом виде. Цветные рисунки не допускаются. Рисунки не редактируются. Основные линии на рисунках (границы блоков и соединительные линии на схемах, линии графиков) имеют толщину 1.25 pt, вспомогательные (линии-выноски, оси, размерные линии) – 0.75 pt.

Описание содержания рисунка, а также введенных на нем обозначений следует приводить в основном тексте статьи. Подпись под рисунком содержит только его номер (шрифт «Times New Roman», курсив, 10 pt) и располагается по центру рисунка. Все тексты и

обозначения на рисунке даются шрифтом размером 10 pt, индексы 8 pt с единичным межстрочным интервалом; цифровые обозначения на линиях выносок и номер рисунка даются курсивом. Буквенные обозначения фрагментов рисунка (шрифт «Times New Roman», курсив, 10 pt) ставятся внизу фрагмента; интервалы: перед рисунком 6 pt, после него 6 pt.

При невозможности представить электронные версии рисунков следует представить только твердые копии, обеспечивающие качественное воспроизведение рисунков после их сканирования (графики – черной тушью на белой бумаге, фотографии – на матовой бумаге размером не менее 9 × 12 см, не более 21 × 30 см).

*Перечень основных тематических направлений журнала:*

- Радиоэлектроника и телекоммуникации.
- Физика твердого тела и электроника.
- Информатика, управление и компьютерные технологии.
- Автоматизация и управление.
- Электротехника.
- Приборостроение и информационные технологии.
- Биотехнические системы в медицине и экологии.
- Управление качеством, инновационный и антикризисный менеджмент.
- Гуманитарные науки.
- История науки, образования и техники.
- Современные технологии в образовании.

*Рукописи аспирантов печатаются бесплатно.*

Технические вопросы можно выяснить по адресу: [Izvestiya-leti@yandex.ru](mailto:Izvestiya-leti@yandex.ru)