

---

---

# ДОКЛАДЫ БГУИР

---

---

**Выходит два раза в квартал**

Научный журнал издается с января 2003 года

**Главный редактор М.П. Батура**

**Редакционная коллегия:**

**А.П. Кузнецов** (зам. главного редактора),  
**Л.М. Лыньков** (зам. главного редактора),

**Т.В. Борботько** (ответственный секретарь),  
**В.Е. Борисенко, С.Е. Карпович, Н.Т. Квасов, В.К. Конопелько,**  
**А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, Р.Х. Садыхов**

**Редакционный совет:**

**И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднар, С.В. Бордусов,**  
**С.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, А.Л. Гурский, Л.И. Гурский, А.П. Достанко,**  
**В.А. Емельянов, И.Е. Зуйков, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, С.П. Кундас,**  
**В.А. Куренев, В.И. Курмашев, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков, Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко,**  
**А.А. Петровский, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, В.А. Сокол, Н.К. Толочко,**  
**А.А. Хмыль, В.В. Цегельник, В.А. Чердынцев, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик**

*АДРЕС РЕДАКЦИИ:*

220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, к. 325

293-88-41

[doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by)

[www.doklady.bsuir.by](http://www.doklady.bsuir.by)

## СОДЕРЖАНИЕ

*ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА*

<b>Малкин В.А.</b> Синтез робастного контура угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата	5
<b>Баканович Э.А., Кривоносова Т.М.</b> Обобщенная математическая модель программно-управляемого вероятностного элемента	11
<b>Абдулькадер Хамза Абдулькабер</b> Влияние скорости движения хладагента в полимерных тепловых экранах на их коэффициенты передачи и отражения	16
<b>Сокол В.А., Яковцева В.А., Шиманович Д.Л.</b> Особенности применения пористых оксидов алюминия	21

<b>Литвинович Г.В.</b> Формирование пористых анодных пленок оксида алюминия с утолщенным барьерным слоем $Al_2O_3$ : исследование их состава, структуры и свойств.....	28
<b>Трухан А.В.</b> Оптимизация сетей телекоммуникаций на основе требований к качеству обслуживания .....	33
<b>Юрцев О.А., Юбко А.П., Москалев Д.В., Наумович Н.М.</b> Сравнительный анализ плоских активных антенных решеток с разной формой раскрыва по энергетическому показателю.....	39
<b>Меженная М.М., Осипов А.Н., Давыдов М.В., Давыдова Н.С. Москалев Д.В.</b> Метод и техническое обеспечение адаптивной электромиостимуляции на основе суммарной электромиографии нервно-мышечного аппарата человека	46
<b>Утин Л.Л., Кред Х.М., Сабериан М.А.</b> Оптимизация размещения в объектах информатизации электронных вычислительных машин для минимизации их радиоизлучений	53
<b>Самко А.Р., Боброва Н.Л., Герман О.В.</b> Построение многомерного нечеткого распознавателя на обучающем множестве.....	60
<b>Мухуров Н.И.</b> Объемно-планарный конструктивный вариант микродатчика относительной влажности на нанопористом оксиде алюминия .....	66
<b>Клименко А.В.</b> Применение динамической имитации для повышения эффективности функционирования вероятностных производственных систем .....	71
<b>Сморodin В.С.</b> Синтез динамической структуры вероятностных производственных систем .....	77
<b>Томаль В.С.</b> Выбор технологических режимов ультразвуковой очистки электронно-оптических изделий.....	83
<b>Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В.</b> Двухволновой гиротрон на модах шепчущей галереи. ....	89
<b>Дежкунов Н.В., Котухов А.В., Столер В.А., Колтович В.А., Николаев А.Л.</b> Влияние импульсного модулирования ультразвукового поля на динамику развития кавитационной области и активность кавитации.....	92

Учредитель: учреждение образования  
"Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"

Редактор Т. В. МИРОНЕНКО  
Компьютерный дизайн и вёрстка Е. Г. МАКЕЙЧИК

---

Подписано в печать 13.03.2012. Формат 60×84 1/8. Гарнитура "Таймс". Бумага офсетная.  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 9,8. Тираж 120 экз. Заказ 115.  
Индекс для индивидуальной подписки 00787.  
Индекс для ведомственной подписки 007872.

---

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/0494175 от 03.04.2009. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Издатель: учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники".  
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2012

---

---

# DOKLADY BGUIR

---

---

**Published twice quarterly**

The journal has been published since January, 2003

**Editor-In-Chief M. P. Batura**

*ADDRESS OF EDITORIAL OFFICE*

*220013, Minsk, P. Brovka Str., 6, Room 325*

*293-88-41*

[doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by)

[www.doklady.bsuir.by](http://www.doklady.bsuir.by)

## CONTENTS

*ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING, INFORMATICS*

<b>Malkin V.A.</b> The synthesis of robust angle stabilization countour of the unmanned aerial vehicle	5
<b>Bakanovich E.A., Krivonosova T.M.</b> Generalized mathematical model of the program-controlled probabilistic element.....	11
<b>Abdulkaber Hamza Abdulkader</b> Influence of velocity of a coolant motion in polymeric thermal screens on their transfer ratios and reflexions	16
<b>Sokol V.A., Jakovceva V.A., Shimanovich D.L.</b> Application features of porous alumina	21
<b>Litvinovich G.V.</b> With thick Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> barrier layer: investigations of their composition, structure and properties	28
<b>Trukhan A.V.</b> Models of maintenance of the set quality of service in networks of telecommunications	33
<b>Yurtsev O.A., Yubko A.P., Moskaliyov D.V., Naumovich N.M.</b> Comparative analysis of flat phased array antennas with various aperture forms on energy criterion	39
<b>Mezhennaya M.M., Osipov A.N., Davydov M.V., Davydova N.S.</b> Method and technical maintenance of adaptive electrical stimulation on the base of global electromyography of human neuromuscular system	46
<b>Utsin L.L., Kriad H.M., Saberian M.A. Zabenkov I.I.</b> Optimization of the placement of computers in the objects of information to minimize their electromagnetic radiation emanation	53
<b>Samko A.R., Bobrova N.L., German O.V.</b> Building multidimensional fuzzy recognizer on a learning set.....	60
<b>Mukhurov N.I.</b> Volume planar variant of design of relative humidity sensors on anodic alumina .....	66

<b>Klimenko A.V.</b> Application of dynamic imitation for increasing of efficiency of functioning of probabilistic productive systems.....	71
<b>Smorodin V.S.</b> Synthesis of dynamic structure for probabilistic productive systems .....	77
<b>Tomal V.S.</b> The choice of operating practices of ultrasonic cleaning of electron-optical products.....	83
<b>Kolosov S.V., Kurayev A.A., Senko A.V.</b> Two-wave gyrotron on whispering gallery modes.....	89
<b>Dezhkunov N.V., Kotukhov A.V., Stoler V.A., Koltovich V.A., Nikolaev A.L.</b> The influence of pulse modulation of an ultrasound field on the dynamics of cavitation zone development and on cavitation activity.....	92



**ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА**

УДК 621.396.934

**СИНТЕЗ РОБАСТНОГО КОНТУРА УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

В.А. МАЛКИН

*Военная академия Республики Беларусь  
Минск–57, 220057, Беларусь**Поступила в редакцию 24 октября 2012*

Рассматривается методика синтеза робастного контура угловой стабилизации для объекта управления с астатизмом первого порядка. Получены структура и параметры робастного регулятора в контуре стабилизации угла тангажа беспилотного летательного аппарата. Представлены результаты моделирования динамических характеристик контура стабилизации при изменении параметров объекта управления.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, система угловой стабилизации, робастный регулятор, динамические характеристики.

**Введение**

Системы управления современными беспилотными летательными аппаратами (БЛА) по своей сложности и предъявляемым к ним требованиям не уступают аналогичным системам в пилотируемой авиации. Важную роль в обеспечении управляемого полета БЛА играет система угловой стабилизации, предназначенная для отработки регулярных управляющих воздействий и парирования случайных возмущений по каналам тангажа, курса и крена.

Классификация и структурные схемы систем автоматической стабилизации углового положения летательных аппаратов представлены в литературе [1–3]. Все контуры угловой стабилизации строятся как замкнутые следящие системы с обратными связями, определяющимися параметрами собственного вращательного движения летательного аппарата. По виду сигналов обратных связей различают законы управления:

- по углу и первой производной угла;
- по углу, первой и второй производным угла;
- по углу, первой производной и интегралу от угла.

Параметры цепей обратных связей контуров угловой стабилизации для фиксированных параметров объекта управления (планера БЛА) выбираются исходя из требуемого качества переходного и установившегося процессов автопилота. Основной проблемой, возникающей при использовании регуляторов с постоянными коэффициентами, является нестационарность контура стабилизации, обусловленная изменением параметров летательного аппарата. Изменения параметров летательного аппарата могут быть вызваны как изменением его аэродинамических характеристик в связи со сменой режима полета (высота, скорость, число М и т.д.), так и изменением массы, моментов инерции и центровки БЛА. Нестационарность объекта управления может привести к недопустимому снижению качества регулирования в контурах стабилизации, а в некоторых случаях и к потере их устойчивости.

Для устранения этих недостатков контуры стабилизации углового положения ЛА строятся как адаптивные системы управления. Адаптивные системы стабилизации содержат основной контур стабилизации и управления полетом, а также контур самонастройки регулятора, за-

дачей которого является идентификация характеристик объекта управления, формирование требуемого критерия качества регулирования и поиск его экстремума [2].

Такие системы достаточно сложны в реализации, обладают следующими недостатками и требуют:

- решения задачи идентификации параметров летательного аппарата в реальном масштабе времени;
- применения специальных тестирующих внешних сигналов (импульсных или гармонических);
- использования достаточно сложных алгоритмов поиска экстремумов нелинейных функций нескольких переменных.

Для беспилотных летательных аппаратов, особенно классов микро и мини, более рациональным является использование робастных систем автоматической стабилизации. Такие системы обладают слабой чувствительностью их динамических характеристик к изменению параметров летательного аппарата в определенном диапазоне изменения этих параметров.

В статье рассматриваются результаты синтеза робастной системы угловой стабилизации БЛА и методика, основанная на концепции обратных задач динамики [4]. Полученные результаты существенно уточняют основные положения, изложенные в работе [4], и позволяют получить структуру системы угловой стабилизации БЛА, достоинствами которой являются обеспечение высокого качества переходных процессов в контуре, а также сохранение требуемых параметров переходного процесса в широком диапазоне изменения характеристик БЛА.

### Синтез робастного контура угловой стабилизации

Синтез робастного контура угловой стабилизации рассмотрим на примере канала стабилизации и управления БЛА по углу тангажа. Данный пример является наиболее общим и позволяет учесть все особенности, характерные для других каналов управления.

Общим для всех каналов управления является то, что передаточная функция объекта управления имеет астатизм первого порядка. Рассмотренная в работе [4] методика построения регуляторов для астатических объектов управления не позволяет получить работоспособную схему контура стабилизации.

Сущность предлагаемой в статье методики синтеза заключается в следующем. Передаточная функция БЛА по каналу тангажа описывается выражением:

$$W_{\delta}^g(p) = \frac{K_g(T_V p + 1)}{p(T_a^2 p^2 + 2\xi_a T_a p + 1)}, \quad (1)$$

где  $K_g = \frac{K_a}{T_V}$  – коэффициент передачи в канале тангажа;  $T_V$  – аэродинамическая постоянная времени БЛА;  $K_a$ ,  $T_a$ ,  $\xi_a$  – коэффициент передачи, постоянная времени и коэффициент демпфирования по углу атаки.

При синтезе закона управления в канале тангажа предполагается, что наибольшие изменения могут претерпевать параметры БЛА  $K_a$ ,  $T_a$ ,  $\xi_a$ . Поскольку разомкнутая передаточная функция  $W_{\delta}^g(p)$  имеет астатизм первого порядка, для нормальной работы контура стабилизации требуется введение функционально необходимой отрицательной обратной связи по положению. В результате введения этой обратной связи получается исходная структурная схема контура стабилизации, по которой осуществляется синтез робастного регулятора (рис. 1).

В соответствии с концепцией ОЗД структура и параметры регулятора выбираются таким образом, чтобы на выходе передаточной функции объекта управления по углу атаки формировался такой же сигнал, как и на выходе эталонной модели, в качестве которой принята система 3 порядка

$$\ddot{y} + a_2 \dot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = a_0 \Delta \vartheta', \quad (2)$$

где  $\Delta \vartheta' = k_1 \Delta \vartheta$ .

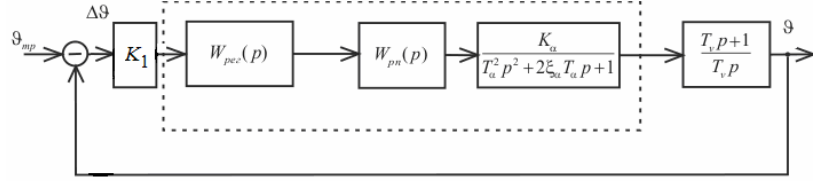


Рис. 1. Структурная схема контура стабилизации по каналу тангажа

Коэффициенты модели выбираются исходя из желаемых свойств переходного процесса при обработке единичного ступенчатого воздействия. Коэффициент  $a_0 = \omega_0^3$  определяет скорость протекания переходного процесса в системе с характеристическим уравнением, соответствующим формуле (2). В данном случае  $\omega_0 = \frac{1}{T_0}$  – собственная частота системы (2). Коэффици-

циенты  $a_1$  и  $a_2$  могут быть выбраны как коэффициенты полинома Баттерворта 3 порядка:  $a_1 = 2,41\omega_0^2, a_2 = 2,41\omega_0$ . Коэффициент  $k_1$  выбирается исходя из требуемого значения добротности контура по скорости.

Условием близости фазовых траекторий  $|\alpha(t) - y(t)| < \varepsilon \rightarrow 0$  является условие минимума функции

$$G(u) = (\ddot{y} - \ddot{\alpha}(u))^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Выбирается такое управление  $u(t)$ , которое обеспечивает минимум функции (3) в каждый текущий момент времени (локальная минимизация). Условие минимума функции (3) имеет вид [5]:

$$\dot{u} = -\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u} = k(\ddot{y} - \ddot{\alpha}), \quad (4)$$

где  $\lambda$  – постоянный коэффициент,  $k = -\lambda a_0$  выбирается также постоянным ( $k = 8 \div 10$ ).

Проинтегрировав уравнение (4) при нулевых начальных условиях, получим выражение для функции управления:

$$u = k(\ddot{y} - \ddot{\alpha}) = k(a_0 \int (k_1 \Delta\theta - y) dt - a_2 \dot{y} - a_1 y - \ddot{\alpha}). \quad (5)$$

С учетом близости траекторий  $\alpha(t)$  и  $y(t)$  в уравнении (5) можно произвести приближенную замену переменных:  $y(t) = \alpha(t); \dot{y}(t) = \dot{\alpha}(t)$ . Тогда выражение для функции управления  $u(t)$  будет иметь вид:

$$u(t) = k[a_0 \int (k_1 \Delta\theta - \alpha) dt - a_1 \alpha - a_2 \dot{\alpha} - \ddot{\alpha}] \quad (6)$$

Структурная схема робастного контура стабилизации и управления по каналу тангажа представлена на рис. 2.

Снижение степени влияния параметров объекта управления  $K_\alpha, T_\alpha, \xi_\alpha$  на качество переходного и установившегося режимов заключается в том, что передаточная функция  $W_s^9(p)$  охвачена тремя контурами отрицательных обратных связей: по углу атаки и двум его производным. С учетом допущения о безынерционности рулевого привода получим передаточную функцию разомкнутой части системы, обведенной на рис. 2 пунктиром:

$$W_p(p) = \frac{kk_\alpha a_0}{(T_\alpha^2 + kk_\alpha) p^3 + (2\xi_\alpha T_\alpha + kk_\alpha a_2) p^2 + (1 + kk_\alpha a_1) p + kk_\alpha a_0}.$$

Даже при сравнительно небольших значениях  $k$  выполняются условия  $kk_\alpha \gg T_\alpha^2; kk_\alpha a_2 \gg 2\xi_\alpha T_\alpha; kk_\alpha a_1 \gg 1$ . В этом случае передаточная функция разомкнутой час-

ти контура определяется выражением  $W_p(p) = \frac{a_0}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$ , т.е. перестает зависеть от параметров объекта управления и определяется только коэффициентами эталонной модели.

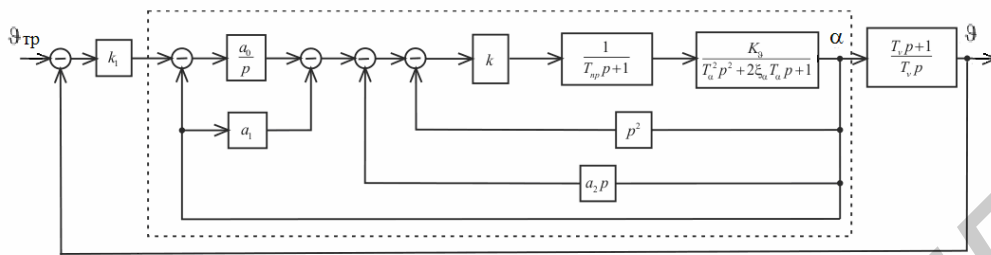


Рис. 2. Структурная схема робастного контура стабилизации

Таким образом, полученный в результате синтеза закон управления обеспечивает низкую чувствительность (робастность) характеристик переходного процесса и устанавливавшегося движения к изменению параметров объекта управления (БЛА). По сложности реализации предлагаемая схема регулятора незначительно отличается от классического *PID*-регулятора. Используемые в цепях обратных связей величины  $\dot{\alpha}$  и  $\ddot{\alpha}$  могут быть заменены значениями  $\dot{\vartheta}$  и  $\ddot{\vartheta}$ , которые вычисляются в пилотажно-навигационном комплексе БЛА.

### Результаты математического моделирования контура стабилизации

Проверка качества функционирования робастного контура стабилизации по углу тангажа проводилась путем компьютерного моделирования с использованием пакета *MATLAB-SIMULINK*.

Математическая модель контура угловой стабилизации включает в себя следующие составные части:

- математическую модель БЛА по каналу тангажа;
- математическую модель рулевого привода;
- математическую модель исследуемого робастного регулятора;
- математическую модель классического *PID*-регулятора;
- математическую модель входных сигналов;
- средства визуализации результатов моделирования.

В качестве математической модели БЛА по каналу тангажа использована линейная модель, описываемая передаточной функцией вида (1). В математической модели БЛА предусмотрена возможность оперативного изменения коэффициентов  $K_\alpha, T_\alpha, \xi_\alpha$ . Математическая модель рулевого привода позволяет учесть значение добротности контура РП, а также ограничения по углу отклонения руля высоты  $\delta_e$  и скорости его отработки  $\dot{\delta}_e$ . Математическая модель предлагаемого робастного регулятора реализует закон управления вида (6).

Для сравнительного анализа характеристик процессов управления в контур стабилизации введена модель классического *PID*-регулятора параллельного типа, коэффициенты которого определяются, исходя из требуемых характеристик процессов при номинальных значениях параметров модели БЛА.

Наиболее полную характеристику динамических свойств системы как в переходном, так и в установившемся режимах дает реакция системы на единичное ступенчатое воздействие. Поэтому этот вид входного сигнала является основным. Кроме этого, при тестировании могут использоваться гармонический и линейно изменяющийся сигналы. В качестве случайных возмущений может использоваться либо белый шум, формируемый стандартным генератором пакета *SIMULINK*, либо окрашенный шум, формируемый с помощью специальных фильтров.

Методика проведения экспериментов заключается в определении зависимости характеристик переходного процесса (длительность  $T$  и перерегулирование  $\sigma$ ) в зависимости от изменения параметров объекта управления. Изменение параметров объекта управления приводится в относительных единицах – процентах от их номинальных значений.

Получение переходных процессов при скачкообразном изменении  $\vartheta_{\text{зад}} = 5^\circ$  и заданных значений параметров модели БЛА повторяется для двух исследуемых схем: предлагаемого робастного регулятора и классического  $PID$ -регулятора. Коэффициенты  $PID$ -регулятора настраиваются для номинальных значений параметров БЛА. На рис. 3 и 4 приведен вид переходных процессов при обработке ступенчатого воздействия двумя типами регуляторов для номинальных (рис. 3) значений параметров и при увеличении параметра  $T_\alpha$  в 2 раза (рис. 4).

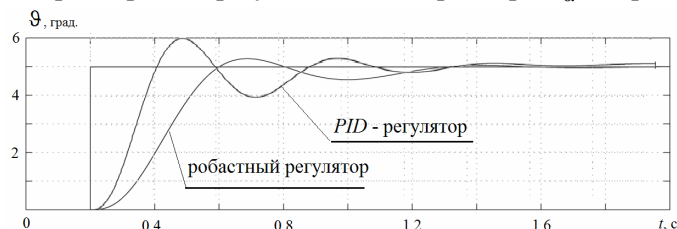


Рис. 3. Переходный процесс при номинальных значениях параметров объекта управления

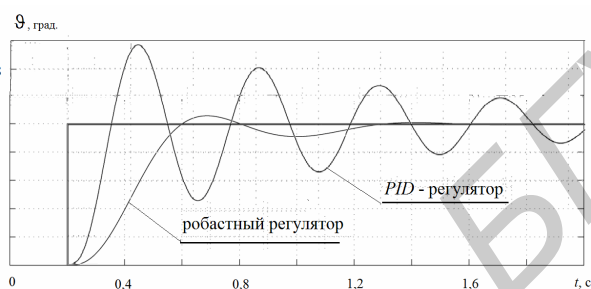


Рис. 4. Переходный процесс при увеличении  $T_\alpha$  в 2 раза

С использованием приведенной выше модели исследовалось также влияние случайного входного воздействия на процессы, протекающие в контуре. В экспериментах на вход контура стабилизации подавалось единичное ступенчатое воздействие, дополнительно к которому на вход объекта управления подавалось случайное возмущение различной интенсивности и ширины спектра. На рис. 5 показаны переходные процессы, а также участок установившегося состояния при обработке единичного ступенчатого входного сигнала с учетом случайного возмущения.

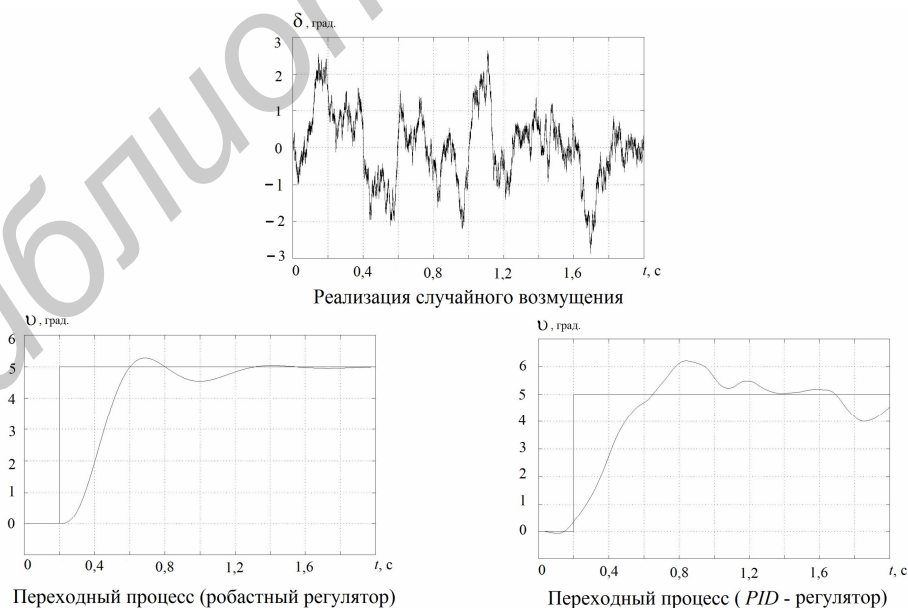


Рис. 5. Переходные процессы при обработке единичного ступенчатого входного сигнала с учетом случайного возмущения

## Выводы

1. Постоянное входное воздействие обрабатывается контуром стабилизации по тангажу с предлагаемой структурой и параметрами регулятора без статической ошибки.

2. Качество переходного процесса в контуре стабилизации с предлагаемой схемой регулятора остается высоким (перерегулирование  $< 10\%$ , время переходного процесса  $T=0,2 - 0,4$  с) при вариациях параметров объекта управления в диапазоне:  $T_\alpha$  от 30% до 300% от номинального значения;  $K_\alpha$  – от 30% до 500% от номинала;  $\xi_\alpha$  – от 10% до 500% от номинала. Для классического *PID*-регулятора качество переходного процесса существенно ухудшается при отклонении параметров на величину  $\pm 30\div 50\%$  от номинальных значений.

3. Уровень флуктуационной составляющей сигнала на выходе контура стабилизации с предлагаемой схемой робастного регулятора примерно на порядок ниже, чем для системы с классическим *PID*-регулятором.

## THE SYNTHESIS OF ROBUST ANGLE STABILIZATION COUNTOUR OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE

V.A. MALKIN

### Abstract

The methodic of synthesis of robust angle stabilization countour for the control object with astatism of the 1<sup>st</sup> order is considered. The structure and parameters of the robust controller in the pitch stabilization countour of the unmanned aerial vehicle are received. The results of the stabilization countour dynamic research of under the control object parameters modification are presented.

### Список литературы

1. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. М., 1973.
2. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. М., 1973.
3. Распопов В.Я. Микросистемная авионика: учебное пособие. Тула, 2010.
4. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М., 2004.
5. Пупкова К.А., Егунова Н.Д. Классическая и современная теория автоматического управления. М., 2004.

УДК 681.3.519.241.2

## ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО ЭЛЕМЕНТА

Э.А. БАКАНОВИЧ, Т.М. КРИВОНОСОВА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 14 ноября 2011

Приводится математическое описание программно-управляемого вероятностного элемента (вероятностного конъюнктора) в достаточно общем предположении относительно свойств и числовых характеристик потоков случайных и детерминированных сигналов, поступающих на входы конъюнктора. Обобщенная математическая модель позволяет осуществлять программное управление вероятностью наступления случайного события при использовании элементов с различным числом импульсных и потенциальных входов, а также выполнять параллельное и последовательное соединения вероятностных элементов при организации стохастических сетей.

*Ключевые слова:* стохастическое устройство, математическая модель, вероятностный элемент, поток случайных событий, распределение Пуассона, поток Пальма, функции Пальма – Хинчина.

### Введение

Возможность организации программного управления параметром пуассоновского потока сигналов [1] является предпосылкой расширения функциональных возможностей цифровых структур, используемых для генерирования потоков случайных событий с управляемыми вероятностными и временными характеристиками. В частности, появляется возможность автоматически выбирать вид оператора преобразования первичных случайных и детерминированных потоков и адаптировать параметры генераторов потоков случайных событий к характеру решаемых задач. Однако это требует обобщения и уточнения математических моделей, описывающих работу управляемых вероятностных конъюнкторов [2, 3].

### Обобщенная математическая модель

Пусть на схему совпадения поступают поток бесконечно коротких импульсов  $\varphi_S(z)$ , интервалы между которыми  $\vartheta$  имеют плотность распределения вероятностей  $f(\vartheta)$ , и поток  $Y_{\Pi}(t)$  прямоугольных сигналов, длительности которых  $\tau$  являются случайными величинами с плотностью распределения вероятностей  $f(\tau)$ . Интервалы между моментами появления последовательных прямоугольных сигналов также случайны, а их функция распределения определяется способом включения конъюнктора – рис. 1. Будем интерпретировать работу конъюнктора как процесс «набрасывания» случайного временного интервала  $\tau$  на импульсный поток  $\varphi_S(z)$ ; начало набрасываемого интервала  $\tau$  может оказаться внутри любой паузы потока бесконечно коротких импульсов  $\varphi_S(z)$ . Нас интересует вероятность появления на выходе конъюнктора по крайней мере одного сигнала потока  $\varphi_S(z)$  при осуществлении случайного испытания, т.е. в течение времени, когда конъюнктор открыт по потенциальному входу.

Прежде чем приступить к выводу соотношений, описывающих поведение рассматриваемого вероятностного конъюнктора, приведем некоторые положения теории случайных им-

пульсных потоков [4, 5], которые при построении обобщенной модели конъюнктора будут играть важную роль.

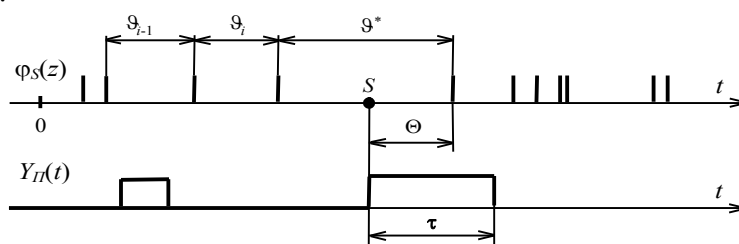


Рис. 1. Временная диаграмма работы управляемого вероятностного элемента; иллюстрация к построению обобщенной математической модели

Для стационарного и ординарного потока Пальма  $\varphi_S(z)$  бесконечно коротких импульсов с плотностью распределения интервалов  $\vartheta$  между соседними сигналами  $f(\vartheta)$  плотность распределения  $f(\vartheta^*)$  интервала  $\vartheta^*$ , на который случайным образом падает точка (точка  $S$  на рис. 1), т.е. начало осуществления случайного испытания, определяется выражением

$$f(\vartheta^*) = \begin{cases} \vartheta \cdot f(\vartheta) / m\vartheta, & \vartheta > 0, \\ 0, & \vartheta < 0, \end{cases} \quad (1)$$

а плотность распределения остатка времени  $\theta$  от момента падения точки  $S$ , случайно брошенной на поток  $\varphi_S(z)$ , до момента поступления первого после этого импульса потока  $\varphi_S(z)$  определяется выражением

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{m_\vartheta} \cdot \int_\theta^\infty f(\vartheta) d\vartheta, & \theta > 0, \\ 0, & \theta < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Доказательства справедливости (1) и (2) приводятся в [5].

Теорема, устанавливающая связь между требуемой вероятностью появления по крайней мере одного сигнала на выходе вероятностного конъюнктора и характеристиками входных потоков  $\varphi_S(z)$  и  $Y_{II}(t)$ , может быть сформулирована следующим образом.

*Теорема 1.* Для стационарного и ординарного потока Пальма  $\varphi_S(z)$  бесконечно коротких сигналов с плотностью распределения вероятностей интервалов  $\vartheta$  между соседними импульсами  $f(\vartheta)$ , вероятность попадания по крайней мере одного сигнала в независимый от  $\varphi_S(z)$  случайный интервал  $\tau$ , подчиняющийся распределению  $f(\tau)$ , определяется выражением

$$P_{\geq 1}[f(\vartheta); f(\tau); \tau] = \int_0^\tau \int_0^\tau [1/m_\vartheta \cdot \int_\vartheta^\infty f(\vartheta) d\vartheta] \cdot f(\tau) d\vartheta d\tau. \quad (3)$$

Для доказательства этой теоремы вновь обратимся к рис. 1. Искомая вероятность, очевидно, соответствует вероятности выполнения условия  $\theta < \tau$ :

$$P(\theta < \tau) = \int_0^\tau f(\theta) d\theta. \quad (4)$$

При заданном законе распределения случайной величины  $\tau$  вероятность  $P_{\geq 1}[f(\vartheta); f(\tau); \tau]$  можно определить как математическое ожидание функции, закон распределения аргумента которой известен:

$$P_{\geq 1}[f(\vartheta); f(\tau); \tau] = \int_0^\infty P(\theta < \tau) \cdot f(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Подставляя (2) в (4) и (4) в (5) приходим к выражению (3).



Из этой теоремы вытекает ряд следствий.

*Следствие 1.* Для стационарного и ординарного потока Пальма  $\varphi_S(z)$  бесконечно коротких сигналов с плотностью распределения  $f(\vartheta)$  длин интервалов  $\vartheta$  между соседними импульсами вероятность попадания по крайней мере одного сигнала в набрасываемый в случайный момент времени на этот поток интервал фиксированной длины  $\tau$  определяется выражением

$$P_{\geq 1}[f(\vartheta); \tau] = 1/m_{\vartheta} \cdot \int_0^{\tau} \int_0^{\infty} f(\vartheta) d\vartheta dt. \quad (6)$$

Справедливость (6) непосредственно следует из (4), если учесть (2). Выражение (6) может быть получено и с использованием функций Пальма-Хинчина [6]. В частном случае, когда поток  $\varphi_S(z)$  является пуассоновским потоком с интенсивностью  $\lambda$  из (6) получаем  $r = P_{\geq 1}(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}$ , что соответствует частному случаю, рассмотренному в [2].

*Следствие 2.* Вероятность попадания по крайней мере одного сигнала регулярного потока  $X_R(t)$  с периодом следования импульсов  $T$  в случайный временной интервал  $\tau$  (поток  $Y_{II}(t)$ ), подчиняющийся распределению  $f(\tau)$  и набрасываемый на регулярный поток в случайный момент времени, не зависящий от  $X_R(t)$  (рис. 2), определяется выражением

$$P_{\geq 1}[f(\tau); T] = 1/T \cdot \int_0^T \tau \cdot f(\tau) d\tau + \int_T^{\infty} f(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Плотность распределения длин интервалов в регулярном потоке  $X_R(t)$  может быть представлена в виде  $\delta$ -функции  $f(T) = \delta(t - T)$ . При набрасывании случайного интервала  $\tau$  на регулярный поток  $X_R(t)$  условие  $\theta < \tau$  (рис. 2) может быть выполнено при  $\tau < T$  с вероятностью

$$P(\theta < \tau) = \int_0^{\tau} \left\{ \left[ 1 - \int_0^{\tau-t} \delta(t - T) dt \right] / T \right\} d\tau = \tau / T, \text{ а при } \tau > T \text{ } P(\theta < \tau) = 1.$$

Таким образом,

$$P(\theta < \tau) = \begin{cases} \tau / T, & \tau < T, \\ 0, & \tau > T. \end{cases} \quad (8)$$

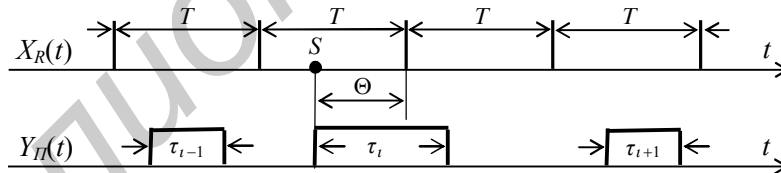


Рис. 2. Временная диаграмма работы управляемого вероятностного элемента; частный случай: регулярный импульсный поток  $X_R(t)$  с управляемой частотой и случайный поток прямоугольных сигналов  $Y_{II}(t)$  (стробов) с заданной плотностью распределений вероятностей длительностей  $f(\tau)$

Подставляя (8) в (5), получаем (7). В частном случае, когда длина набрасываемого интервала  $\tau$  распределена по показательному закону с параметром  $\lambda$ , из (7) непосредственно по-

$$\text{лучаем } P(A) = \int_T^{\infty} f_1(\tau + \vartheta) dt = (1 - e^{-\lambda T}) / \lambda T.$$

*Следствие 3.* Вероятность попадания по крайней мере одного сигнала стационарного пуассоновского потока бесконечно коротких импульсов  $\varphi_S(z)$  с интенсивностью  $\lambda$  в набрасываемый в случайный момент времени случайный интервал  $\tau$ , подчиняющийся показательному распределению с параметром  $\mu$ , определяется выражением

$$p = P_{\geq 1}(\lambda; \mu) = \lambda / (\lambda + \mu). \quad (9)$$

В этом случае  $f(\vartheta) = \lambda e^{-\lambda\vartheta}$  и  $f(\tau) = \mu e^{-\mu\tau}$ . Поэтому  $P(\theta < \tau) = 1 - e^{-\lambda\vartheta}$ ;

$$P = P_{\geq 1}(\lambda; \mu) = \int_0^{\infty} (1 - e^{-\lambda\vartheta}) \cdot \mu e^{-\mu\tau} d\tau = \lambda / (\lambda + \mu).$$

*Следствие 4.* Вероятность попадания по крайней мере одного сигнала регулярного импульсного потока  $X_R(t)$  с периодом между импульсами  $T$  в набрасываемый на  $X_R(t)$  в случайный момент времени интервал фиксированной длины  $\tau$  определяется выражением

$$P_{\geq 1}(T, \tau) = \begin{cases} \tau/T, & \tau < T, \\ 1, & \tau > T. \end{cases} \quad (10)$$

Доказательство справедливости (10) может быть осуществлено на основе методики, которая использовалась для вывода (7).

На рис. 3 приведены характеристики управляемого вероятностного конъюнктора для частного случая, когда  $\varphi_S(z)$  является стационарным пуассоновским потоком с параметром  $\lambda$ , а набрасываемый интервал подчиняется показательному распределению с параметром  $\mu$  – формула (9).

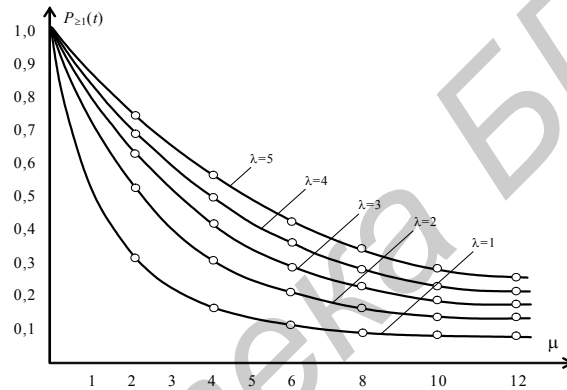


Рис. 3. Характеристики управляемого вероятностного элемента

В заключение рассмотрим часто встречающийся на практике случай, когда интервал времени, в течение которого конъюнктор открыт по потенциальному входу, ограничен неслучайной величиной  $T_0$  – рис. 4.

*Теорема 2.* Для стационарного и ординарного потока Пальма  $\varphi_S(z)$  бесконечно коротких импульсов с плотностью распределения вероятностей длин интервалов  $\vartheta$  между соседними сигналами  $f(\vartheta)$ , вероятность попадания по крайней мере одного сигнала в независимый от  $\varphi_S(z)$  интервал длиной  $\tau$  с плотностью распределения вероятностей  $f(\tau)$  (причем  $\tau < T_0$ ,  $T_0$  – некоторая неслучайная величина) равна

$$P_{\geq 1}[f(\vartheta); f(\tau); T_0] = \int_0^{T_0} f(\tau) \cdot \int_0^{\tau} f(\theta) d\theta d\tau + \int_{T_0}^{\infty} f(\tau) \cdot \int_0^{T_0} f(\theta) d\theta d\tau, \quad (11)$$

где  $f(\theta)$  определяется в соответствии с (2).

Обратимся к рис. 4, который иллюстрирует тот факт, что сигнал на выходе конъюнктора появляется тогда, когда  $\tau < T_0$ ,  $\theta < \tau$  или при  $\tau > T_0$ ,  $\theta < T_0$ . Далее для доказательства справедливости (11) может быть использована методика, применявшаяся для вывода (3).

*Следствие 1.* Для управляемого вероятностного конъюнктора, рассмотренного в [3], в соответствии с (11) получим выражение

$$P_{\geq 1}[f(\vartheta); T; T_0] = \begin{cases} (1 - e^{-\mu T}) / \mu T, & T < T_0, \\ (1 - e^{-\mu T_0}) / \mu T, & T > T_0. \end{cases} \quad (12)$$

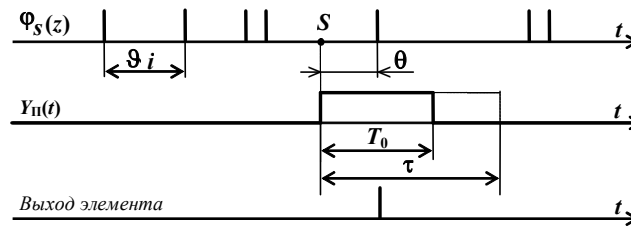


Рис. 4. Временная диаграмма работы управляемого вероятностного элемента; частный случай: длительности случайных прямоугольных сигналов потока  $Y_{\Pi}(t)$  ограничены неслучайной величиной  $T_0$

*Следствие 2.* Для управляемого вероятностного конъюнктора в соответствии с (11) выражение (9) принимает вид

$$P_{\geq 1}[\lambda; \mu; T_0] = \lambda \cdot e^{-(\lambda+\mu)T_0} / (\lambda + \mu). \quad (13)$$

### Заключение

Рассмотренная математическая модель обобщает результаты, приведенные в ряде статей авторов, посвященных различным способам построения управляемых вероятностных элементов при создании более сложных стохастических устройств – управляемых вероятностных и корреляционных преобразователей, генераторов многомерных случайных величин и т. п. Обобщенная модель позволяет проводить исследования и оценивать точность работы стохастических устройств при различных вероятностных свойствах используемых потоков сигналов; модель включена в состав программно-математического обеспечения автоматизированной системы управления научными исследованиями, моделированием и испытаниями радиотехнических систем.

## GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF THE PROGRAM-CONTROLLED PROBABILISTIC ELEMENT

E.A. BAKANOVICH, T.M. KRIVONOSOVA

### Abstract

The paper represents the mathematical description of the program-controlled probabilistic element (probabilistic AND circuit) in a rather general assumption regarding the properties and numeric characteristics of the flows of random and determined signals, arriving at the inputs of the AND circuit. The generalized mathematical model allows a program-driven control of the random event probability when using the elements with different number of pulsed and potential inputs, as well as a parallel or serial connection of probabilistic elements when arranging stochastic networks.

### Список литературы

1. Баканович Э.А., Кривоносова Т.М. // Докл. БГУИР. 2010, №4 (50). С. 77–83.
2. Баканович Э.А., Кривоносова Т.М. // Докл. БГУИР. 2010, №8 (54). С. 64–71.
3. Баканович Э.А., Кривоносова Т.М., Четыркина З.Н. // Докл. БГУИР. 2011. №4 (58). 5–11.
4. Седакин Н.М. Элементы теории случайных импульсных потоков. – М., изд. «Сов.радио», 1965.
5. Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. М., 1969.
6. Хинчин А.Я. // Труды МИАН им. В.А. Стеклова. 1955. Т. 49.

УДК 004.056.5:621.315.6

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ХЛАДАГЕНТА В ПОЛИМЕРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭКРАНАХ НА ИХ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕДАЧИ И ОТРАЖЕНИЯ

АБДУЛЬКАДЕР ХАМЗА АБДУЛЬКАБЕР

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 9 января 2012

Исследованы особенности взаимодействия радиоизлучения с конструкциями полимерных тепловых экранов охлаждаемых жидкими хладагентами (вода, 50% водный раствор этиленгликоля).

*Ключевые слова:* тепловой экран, коэффициент отражения, коэффициент передачи.

### Введение

Тепловые экраны сегодня находят широкое применение, они используются для обеспечения нормальных тепловых режимов функционирования радиоэлектронных средств, уменьшения теплоотдачи мощных радиопередающих устройств в зону, где размещается обслуживающий ее персонал, а также для решения проблем утечки информации по тепловым каналам, например снижения тепловой заметности военной техники. Основное внимание в таких случаях уделяется изучению процессов конвективного теплообмена, которые в конечном итоге влияют на температуру поверхности теплового экрана. Как было показано в [1], для снижения температуры поверхности защищаемого объекта эффективным представляется использование полимерных тепловых экранов с принудительным охлаждением хладагентами в жидкой фазе.

В многоуровневых системах защиты информации [2] для решения проблемы снижения заметности военной техники в тепловом и радиочастотном диапазонах длин волн тепловой экран используется совместно с экраном электромагнитного излучения радиочастотного диапазона. Широкий рабочий диапазон частот экрана электромагнитного излучения может быть обеспечен за счет применения влагосодержащих волокнистых и композиционных материалов, значения коэффициентов отражения и передачи которых определяются концентрацией влагосодержащего наполнителя [3]. Коэффициенты отражения и передачи для таких конструкций электромагнитных экранов после их изготовления являются величинами практически постоянными, и оперативное их изменение не представляется возможным, что является их недостатком. Для решения данной проблемы необходимо выполнить требование по управляемому изменению концентрации влагосодержащего наполнителя в материале экрана, которому удовлетворяют полимерные тепловые экраны с принудительным жидкостным охлаждением.

Целью данной работы являлось исследование влияния скорости движения хладагента (вода и этиленгликоль) в полимерных тепловых экранах, выполненных на основе сотового поликарбоната, на их коэффициенты передачи и отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–18 ГГц.

### Методика проведения эксперимента

В качестве исследуемой конструкции полимерного экрана использовался сотовый поликарбонат размером 40×40 мм с прямоугольным сечением канала 10×10 мм. Для исследова-

ния экранирующих характеристик такой конструкции использовался испытательный стенд (рис. 1), в состав которого входил панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01-18, работающий по принципу отдельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн.

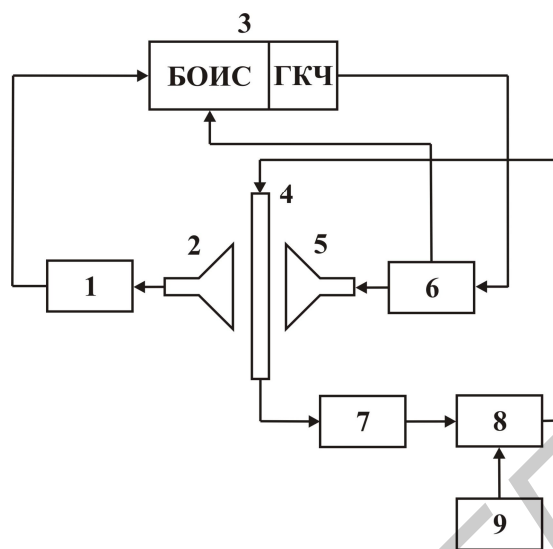


Рис. 1. Схема стенда для исследования коэффициентов передачи и отражения тепловых экранов: 1 – блок В; 2, 5 – измерительные антенны; 3 – измеритель SNA 0,01-18; 4 – исследуемый экран; 6 – блок A/R; 7 – резервуар с хладагентом; 8 – насос; 9 – источник питания

Измерения выполнялись с усреднением результата в 3 раза и включали в себя три этапа. На первом этапе осуществлялась калибровка измерителя, во время проведения которой устанавливался оптимальный уровень мощности для работы его детекторов. Вторым этапом заключался в измерении коэффициента передачи исследуемого экрана. При этом генератор качающейся частоты (ГКЧ) измерителя формировал сигнал в заданной полосе частот и через блок A/R подавал его в передающую антенну. Блок обработки измерительных сигналов регистрировал сигнал, прошедший через исследуемый экран и принятый второй измерительной антенной. На третьем этапе измерялся коэффициент отражения экрана. В этом случае сигнал, формируемый ГКЧ, подавался в измерительную антенну и излучался в направлении исследуемого экрана, отраженный от него сигнал регистрировался этой же антенной и через блок A/R поступал на измеритель. В процессе измерения коэффициентов передачи и отражения скорость движения хладагента через тепловой экран составляла 0,19; 0,25; 0,29; 0,31 м/с (вода) и 0,11; 0,15; 0,22; 0,27 м/с (50%-й водный раствор этиленгликоля). Получение необходимого значения скорости обеспечивалось за счет изменения напряжения питания на насосе. В качестве хладагентов использовались вода и 50 %-й водный раствор этиленгликоля, выбор которых обусловлен их широким применением в охлаждении различных технических средств.

Скорость течения хладагента в трубопроводе рассчитывалась в соответствии со следующей методикой. Хладагент объемом 1 л прокачивался через трубопровод системы в резервуар. Время течения хладагента отсчитывалось с момента его начала поступления в резервуар и до момента полного его заполнения. Средняя скорость вычислялась по формуле [4]:

$$v_{CP} = \frac{Q}{\omega},$$

где  $Q$  – расход хладагента,  $\omega$  – сечение трубопровода,  $m^3$ .

Расчет расхода хладагента выполнялся по формуле:

$$Q = \frac{V}{t}$$

где  $V$  – объем хладагента,  $t$  – время течения хладагента.

## Результаты и обсуждение

Установлено, что для исследуемой конструкции теплового экрана коэффициент передачи зависит от скорости движения хладагента. Использование воды в качестве хладагента (рис. 2) обеспечивает коэффициент передачи конструкции  $-3...-12$  дБ в диапазоне частот  $6,3...18$  ГГц, который увеличивается при возрастании скорости движения хладагента с  $0,19$  до  $0,31$  м/с за счет большего количества воды, поступающей в тепловой экран. Нижняя рабочая частота такой конструкции экрана  $6,3$  ГГц обусловлена расстоянием между соседними каналами конструкции и особенностями их заполнения хладагентом. Коэффициент передачи аналогичной конструкции теплового экрана, охлаждаемой 50%-м водным раствором этиленгликоля (рис. 3), увеличивается с  $-2$  до  $-5,5$  дБ в диапазоне частот  $6,3...18$  ГГц при увеличении скорости движения хладагента с  $0,19$  до  $0,31$  м/с. Меньший диапазон изменений коэффициента передачи в данном случае обусловлен применением хладагента с большей вязкостью, что, в свою очередь, вызывает повышение тормозящего воздействия стенок каналов теплового экрана на поток жидкости за счет большего значения их эквивалентной гидравлической шероховатости.

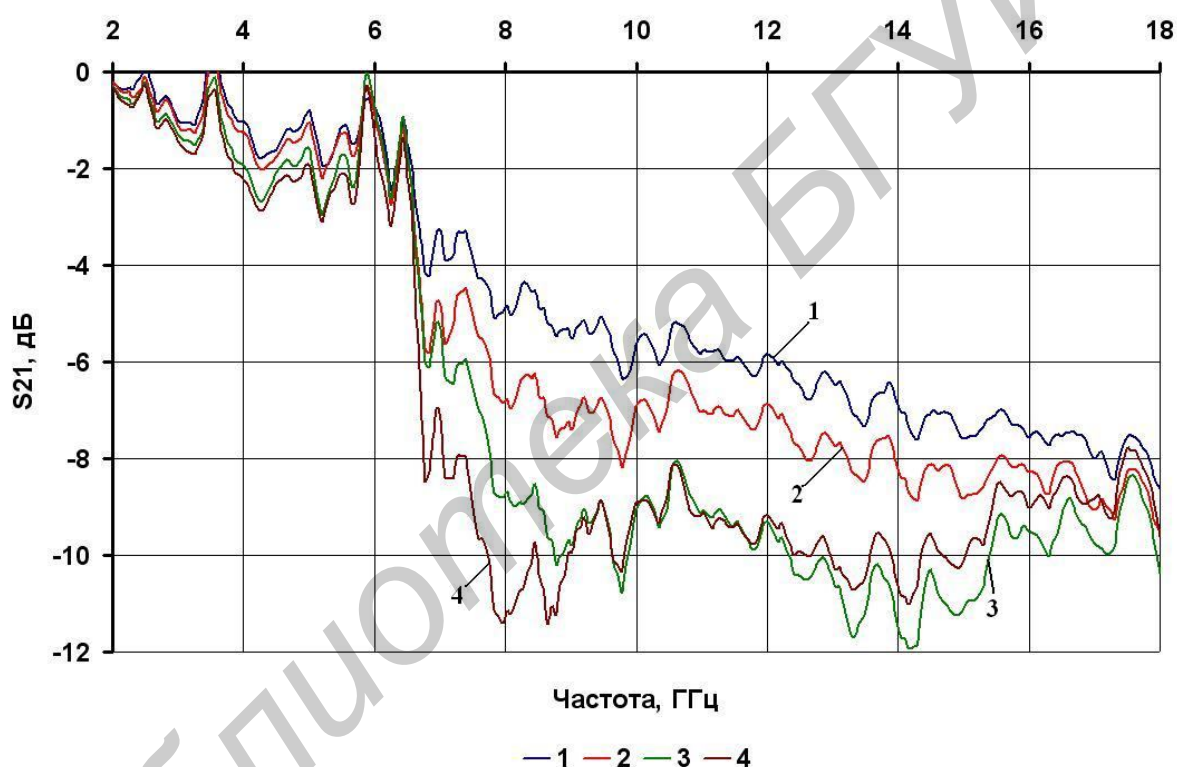


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи полимерного теплового экрана, охлаждаемого водой, от частоты при скорости движения хладагента: 1 –  $0,19$  м/с, 2 –  $0,25$  м/с, 3 –  $0,29$  м/с, 4 –  $0,31$  м/с

Установлено, что скорость движения хладагента в исследуемой конструкции теплового экрана в значительно меньшей степени влияет на коэффициент его отражения. Для конструкции теплового экрана, охлаждаемого водой, зависимость коэффициента отражения от скорости движения хладагента наблюдается лишь в большей степени в диапазоне частот  $10...12$  ГГц (рис. 4), где коэффициент отражения изменяется в пределах  $-3,5...-10$  дБ при скорости движения хладагента  $0,19...0,31$  м/с. Это обусловлено особенностями конструкции экрана, влияющими на протекание хладагента в его каналах. Изменение скорости движения 50%-го водного раствора этиленгликоля позволяет управляемо изменять коэффициент отражения с  $-2$  до  $-17$  дБ в более широком диапазоне частот  $6...12$  ГГц за счет особенностей заполнения каналов теплового экрана таким хладагентом (рис. 5).

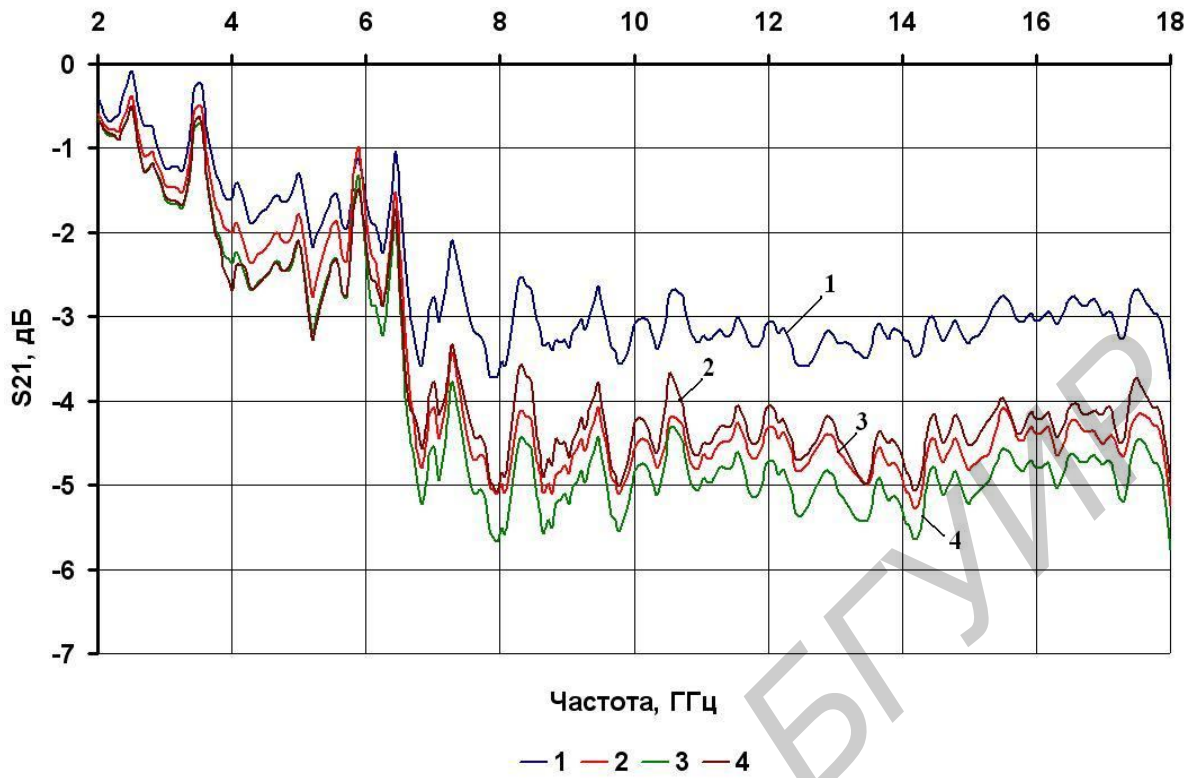


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи полимерного теплового экрана, охлаждаемого 50%-м водным раствором этиленгликоля, от частоты при скорости движения хладагента: 1 – 0,11 м/с, 2 – 0,15 м/с, 3 – 0,22 м/с, 4 – 0,27 м/с

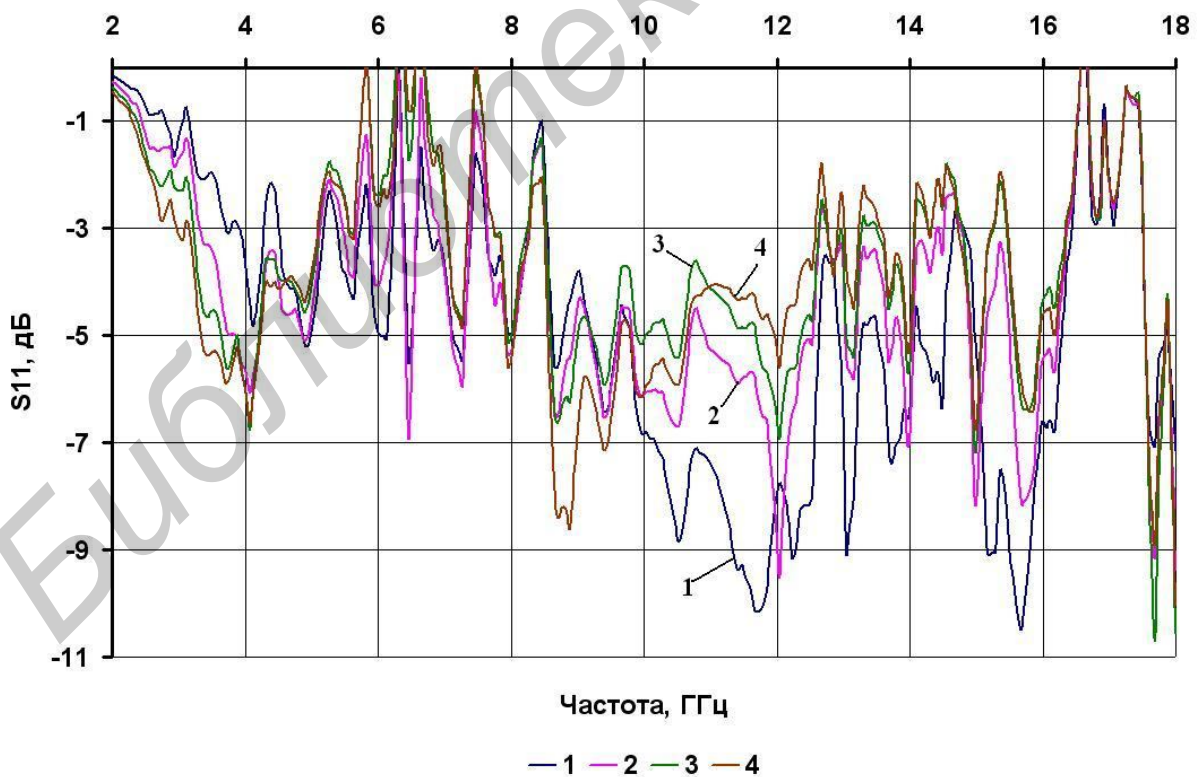


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения полимерного теплового экрана, охлаждаемого водой, от частоты при скорости движения хладагента: 1 – 0,19 м/с, 2 – 0,25 м/с, 3 – 0,29 м/с, 4 – 0,31 м/с



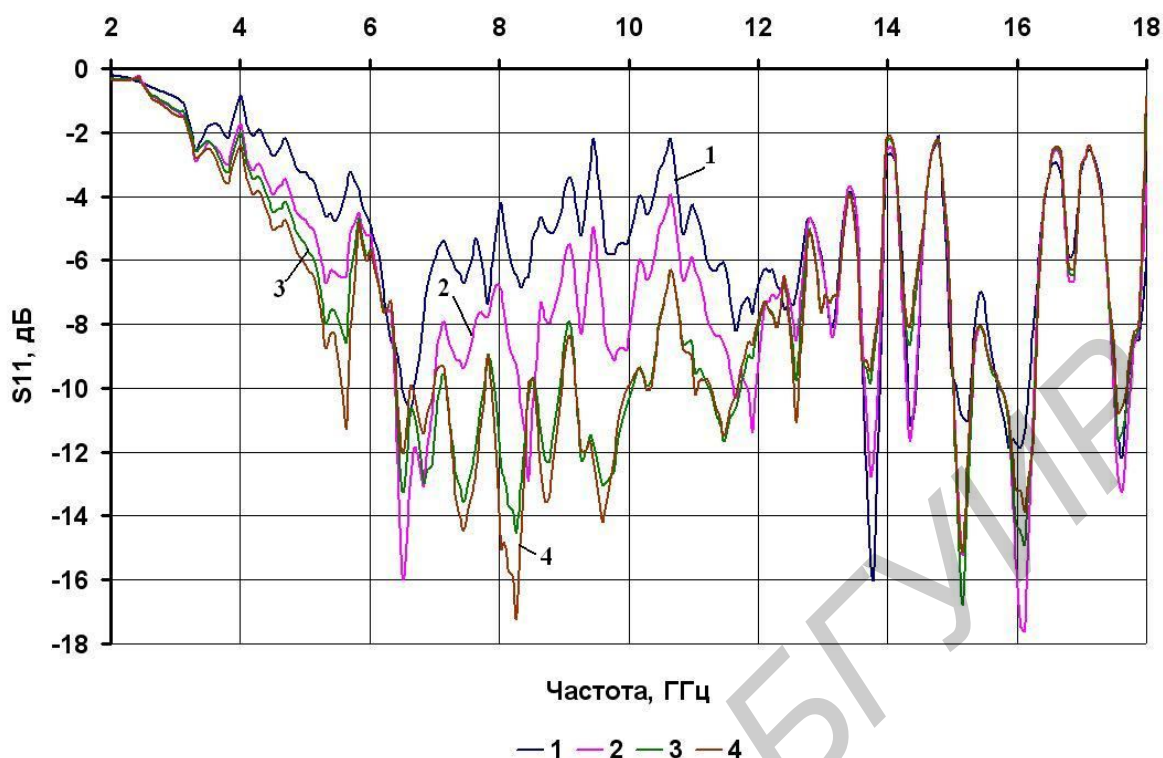


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения полимерного теплового экрана, охлаждаемого 50%-м водным раствором этиленгликоля, от частоты при скорости движения хладагента:  
1 – 0,11 м/с, 2 – 0,15 м/с, 3 – 0,22 м/с, 4 – 0,27 м/с

### Заключение

Таким образом, на основании результатов исследований показана возможность применения полимерных тепловых экранов в качестве радиопоглощающих конструкционных материалов. Показана возможность управляемого изменения их коэффициента передачи и отражения за счет выбора типа хладагента и скорости его движения. Предложенные конструкции тепловых экранов позволяют затруднить перехват информации по электромагнитному и тепловому каналам, причем взаимодействие таких конструкции с радиоизлучением и излучение такими конструкциями теплового потока зависит от используемой охлаждаемой жидкости и скорости ее движения.

## INFLUENCE OF VELOCITY OF A COOLANT MOTION IN POLYMERIC THERMAL SCREENS ON THEIR TRANSFER RATIOS AND REFLEXIONS

ABDULKABER HAMZA ABDULKADER

### Abstract

Features of interaction of a radio-frequency radiation with constructions of polymeric heat shields cooled by liquid refrigerants (water, 50% ethylen glycol water solution) are explored.

### Список литературы

1. Борботько Т.В., Абдулькабер Хамза Абдулькадер, Кофанова О.А. VIII Белорусско-российская науч.-техн. конф. ТСЗИ: Браслав, 24–28 мая 2010 г. Минск, 2010. С. 88–89.
2. Борботько Т.В. Технические средства защиты информации : материалы VII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск-Нарочь, 23–24 июня 2009 г. / БГУИР . Минск, 2009. С. 78.
3. Колбун Н.В., Борботько Т.В., Терех И.С. и др. // Докл. БГУИР. 2004. №6. С. 78–83.



УДК 621.315

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРИСТЫХ ОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ

В.А. СОКОЛ, В.А. ЯКОВЦЕВА, Д.Л. ШИМАНОВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 20 ноября 2011

Приводятся результаты использования пористых оксидов алюминия (ПОА), которые формируются с использованием электрохимического процесса анодирования. Широкое применение ПОА находят в микроэлектронике (анодированные алюминиевые основания, системы многоуровневых межсоединений, алюминиевые корпуса для БИС и ГИМС). Эти оксиды также успешно используются для создания прецизионных мембран, световых экранов, светодиодных устройств, биомолекулярных структур, микрополяризаторов, микроканальных электронных умножителей, шаблонов, солнечных элементов и др.

*Ключевые слова:* алюминий, электрохимическое анодирование, пористый оксид алюминия, мембрана.

### Введение

Одной из важнейших областей применения пористых оксидов алюминия (ПОА) является микроэлектроника. Нами разработана и постоянно развивается электрохимическая алюмооксидная технология (ЭЛАТ) изготовления гибридных интегральных микросхем (ГИМС) и многокристальных микроэлектронных модулей (МКМ) [1–7]. В отличие от всех известных, эта технология позволяет в едином технологическом цикле изготавливать все базовые конструктивные элементы МКМ (анодированные алюминиевые основания, многоуровневые системы межсоединений, алюминиевые корпуса) [8]. Основными технологическими процессами ЭЛАТ являются вакуумное напыление металлических пленок, фотолитография и анодирование. В связи с тем, что применение пористых оксидов алюминия в микроэлектронике имеет широкую опубликованность [1–8], более детально рассмотрим другие области их применения.

### Исследования и результаты

*Технология изготовления и применение мембран на основе ПОА.*

Мембраны на основе ПОА, благодаря хорошим электрофизическим (механическим, температурным, коррозионным и др.) свойствам и возможности достаточно просто получать сквозные капиллярные наноканалы и изменять их геометрические параметры (диаметр и длину), находят широкое применение в самых различных и неожиданных областях: микрофльтрации, ультрафльтрации, диализе, электролизе, осмосе, разделении газов и жидкостей и др.

Разработанный нами технологический процесс изготовления мембран на основе анодированных ПОА базируется на следующих технологических операциях: предварительная температурная и химическая обработка (очистка) и электрохимическая полировка исходной Al фольги; электрохимическое двухстороннее анодирование Al (1 стадия); химическое селективное травление сформированного анодного оксида алюминия; электрохимическое одностороннее анодирование Al (2 стадия); химическое селективное травление остаточного Al; химическое травление барьерного слоя  $Al_2O_3$ .

В работе [9] исследовалась возможность применения мембран на основе ПОА для фльтрации жидкостей и газов. Использовались два типа мембран – сформированные на осно-

ве анодирования в серной кислоте (20%,  $U=20$  В, толщина 65 мкм), и в щавелевой кислоте (4%,  $U=60$  В, толщина 65 мкм). Потоки разных жидкостей, естественно, линейно возрастали с увеличением разницы в давлениях, что подтверждено экспериментально. На рис. 1 представлена зависимость потоков различных по свойствам жидкостей от обратной вязкости. Диаметр пор мембраны 13 нм, толщина 65 мкм, количество пор  $4,6 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Такие же эксперименты были проведены и с мембранами, сформированными анодированием в щавелевой кислоте. Результаты качественно совпадают и указывают на то, что для характеристики свойств анодной оксидной мембраны (АОМ) требуется небольшое количество параметров, которые технологически хорошо управляемы и воспроизводимы.

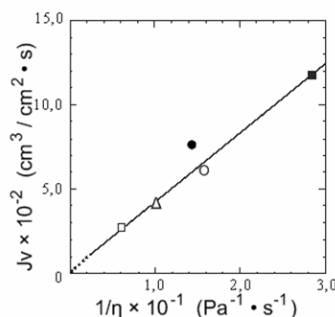


Рис. 1. Зависимость потоков чистых растворителей от обратной вязкости: □ – этанол; ● – бензол; Δ – вода; ○ – метанол; ■ – ацетон;  $Jv$  – поток жидкости (см<sup>3</sup>/см<sup>2</sup>·сек);  $P_a = P_1 - P_2$  – разность давлений по обе стороны мембраны;  $\eta$  – вязкость ( $P_a \cdot \text{сек}$ )

Определенный интерес представляют АОМ в связи с их оптическими свойствами [10–12]. Нами [12] исследована спектральная зависимость прохождения света через АОМ и показано, что светодиодная система подсветки, на поверхности которой расположена мембрана, имеет более высокую интенсивность излучения, максимумы которой находятся в пределах 470 нм и 570 нм.

Своеобразная геометрическая структура ПОА всегда привлекала к себе внимание исследователей с точки зрения их практического применения в качестве промежуточного материала при формировании других регулярных структур, например, металлических мембран, пленок с анизотропной проводимостью, датчиков влажности, мембран для водно-кислородной топливной ячейки [13, 14], матриц металлических нанонитей [15], мембран для композитов с самосмазывающейся поверхностью [16], мембран для селективного пропускания водорода [17, 18], газовых микрофильтров [10, 19, 20], молекулярных фильтров [21–23].

Так, например, нами были получены пленки с анизотропной проводимостью, представляющие собой мембрану, поры которой заполнены металлом (рис. 2). Если измерять проводимость между контактными площадками 1–2, то они оказываются закороченными металлом в порах, а если измерять проводимость между контактными площадками 1–3 или 2–4, то они разделены диэлектриком Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Аналогично на АОМ были изготовлены малоинерционные датчики влажности (рис. 3).

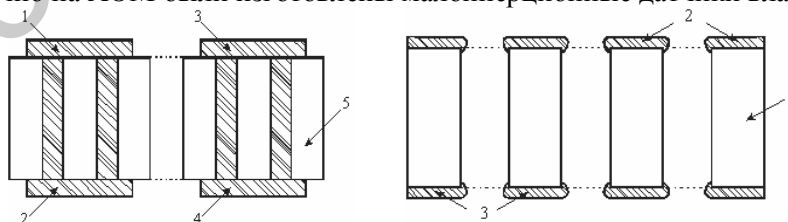


Рис. 2. Пленка с анизотропной проводимостью (1, 2, 3, 4 – контактные площадки, 5 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Рис. 3. Малоинерционный датчик влажности (1 – стенка мембраны Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 и 3 – соответственно верхняя и нижняя обкладки датчика)

В отличие от «классических» датчиков [24, 25] данный датчик построен на основе свободной мембраны, а не на алюминиевом основании, которое является непроницаемой нижней обкладкой, и поэтому переход от высокого значения влажности к более низкому значению, занимает значительное время из-за трудности удаления влаги из закрытых с одной стороны пор.

Разработан способ [26] изготовления микро- и нанонасосов на основе тонких пленок пористого оксида алюминия. Основной корпус нанонасоса состоит из тонкой пленки пористого оксида алюминия (содержащей наноразмерные каналы 40-300 нм в диаметре) с проводящими поверхностями (например, покрывающими слоями Au) на обеих сторонах пленки. Высокоэффективные микро- и нанонасосы могут быть изготовлены благодаря формированию наноканалов в пленке оксида алюминия и последующим процессам отжига и активации поверхности. Наножидкостный поток через наноканалы в тонких пленках ПОА приводится в действие электрическим полем без каких-либо движущихся частей. Скорость потока (до 50 мл/(мин·см<sup>2</sup>)) воды через тонкую пленку оксида алюминия может постоянно регулироваться интенсивностью электрического поля, т.е. электрическим потенциалом постоянного тока, приложенным через каналы. Устройство насоса представлено на рис. 4.

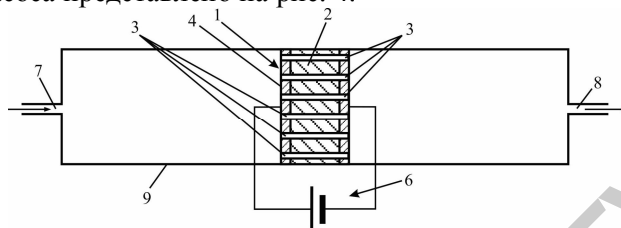


Рис. 4. Устройство насоса: 1 – наружная поверхность; 2 – основа мембраны; 3 – каналы; 4 – 1-ый электрод; 5 – 2-ой электрод; 6 – источник питания; 7 – вход; 8 – выход; 9 – корпус

#### *Световые экраны.*

В данном случае под световыми экранами мы понимаем устройства, в конструкцию которых обязательно входят такие материалы, как оксид алюминия и электролюминесцентный материал. Таким характерным экраном является экран, описанный в американском патенте [26]. Он состоит из подложки, слоя пористого оксида, содержащего электролюминесцентный материал, два электрода и источник напряжения.

В качестве электролюминесцентного материала может быть выбран органический или металлоорганический материал, а также неорганический материал, выбранный среди люминофоров, прямозонных полупроводников и оксидов редкоземельных металлов. Эти материалы могут быть введены в пористый оксид при помощи таких методов, как центрифугирование, испарение, распыление, окунание или золь-гель методом. Основными назначениями пористого оксида в этих конструкциях являются концентрация светового излучения и уменьшение его лепестков, что приводит к увеличению яркости свечения экрана. Аналогичный эффект используется в конструкции, описанной в [27, 28], где пористый оксид не заполняется электролюминесцентным материалом, а располагается на его поверхности. В работе [29] предлагается электролюминесцентный экран, где используется плотный оксид алюминия.

В одном из вариантов мы помещали свободную пленку ПОА между светодиодной панелью подсветки и детектором и измеряли интенсивность проходящего света в зависимости от расстояния между пленкой и панелью подсветки. Эти данные сравнивались с данными, полученными без использования пленок ПОА. Свободные пленки ПОА, сформированные в растворах серной кислоты, обеспечивают усиление интенсивности излучения во всем исследованном диапазоне длин волн. Получено усиление сигнала на детекторе в видимой области спектра в среднем на 11%.

#### *Светодиодные устройства.*

На современном этапе наиболее перспективными устройствами освещения являются светодиодные. По конструкции – это некоторые базовые основания с размещенными на них и соответствующим образом соединенными светодиодами определенного количества. Такие светодиодные устройства имеют различное назначение: квартирное и уличное освещение, освещение переходов и зданий, применение на транспорте и в светофорах, в автомобилях, в рекламных устройствах и на посадочных полосах аэродромов и др. Светодиодные устройства обладают неоспоримыми преимуществами перед известными: низкое энергопотребление (в 4–6 раз ниже) при более высокой степени освещенности; экологичность (т.е. выход из строя устройства, его разрушение, брак не связаны с выделением вредных веществ); возможность получения различной цветовой гаммы (например, в светофорах, рекламе и др.); низкое напряжение питания, не превышающее единиц и десятков Вольт; холодное свечение (важно для примене-

ния в библиотеках, где имеются дорогостоящие старинные книги, для которых недопустим нагрев страниц).

Нами разработана технология светодиодных устройств на алюминиевом основании. Технология включает последовательно следующие базовые операции: подготовку листового алюминиевого основания нужного размера и конфигурации, обработку поверхности алюминия для исключения ее дефектов (царапин) и уменьшения шероховатости, наращивание диэлектрического слоя методом анодирования, осаждение металла, например, меди на поверхность диэлектрического слоя, формирование рисунка системы межсоединений посадочных мест для светодиодов, монтаж светодиодов. Наращивание диэлектрического слоя толщиной 20–50 мкм осуществляется пористым анодированием алюминия. Такой слой обеспечивает пробивные напряжения более 1 кВ. Формирование рисунка проводится с использованием обычной фотолитографии, а учитывая, что, как правило, рисунок достаточно простой и ширина дорожек 100 мкм и более, возможно использование металлических масок. Осаждение меди производится либо путем предварительного вакуумного напыления тонкого слоя (до 1 мкм) с последующим электрохимическим наращиванием до толщины 20–50 мкм, либо химическим и далее электрохимическим методами. На рис. 5 представлено фото светодиодного устройства для уличного освещения, которое включает анодированное алюминиевое основание, расположенное на алюминиевом радиаторе. На основании имеется диэлектрический слой  $Al_2O_3$  толщиной 50 мкм, медная система межсоединений (30 мкм) и смонтированы 40 светодиодов. Напряжение питания 32 В, максимальный ток 1,5 А.

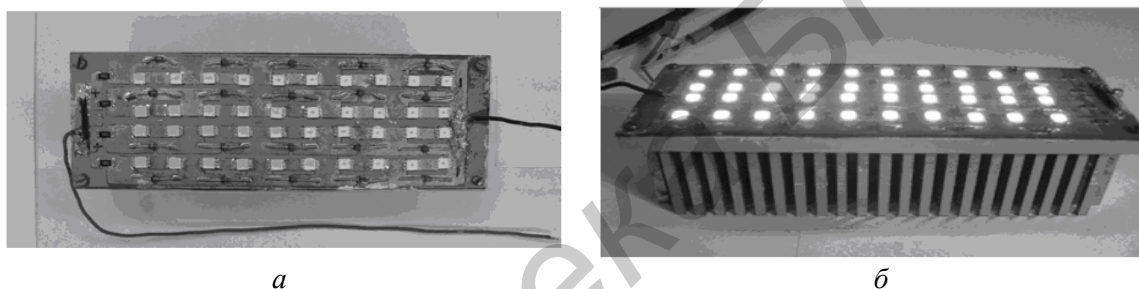


Рис. 5. Светодиодное устройство уличного освещения: *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку

#### *Биомолекулярные структуры.*

Весьма желанным является применение ПОА в биологии, где ожидается создание протеиновых чипов, биодатчиков и других биоприборов, обладающих новыми функциями, на основе упорядоченных конфигураций из находящихся в управляемом состоянии «живых» молекул. В качестве примера подобного применения в работе [30] приводится упорядоченная конфигурация молекул ДНК, сформированная за счет ее адсорбции, за счет введения в качестве концевых групп СН на золоте, которым заполнены поры  $Al_2O_3$ . После «привязывания» Au коллоидов (5÷20 нм) к конфигурации ДНК с помощью сканирующего электронного микроскопа, была проверена конфигурация ДНК. Также сообщается о создании мозаичной структуры, представляющей собой ПОА, внутренняя часть пор которого заполнена попеременно веществами двух видов – Au и Ni. Структуру получали, последовательно проводя селективное травление и заполнение металлами, основываясь на разности толщины барьерного слоя в структуре пор, появление которых индуцируется углублениями, и в случае пор, формируемых самовосстановительным образом. Структуры, в которых периодически располагаются вещества, отличающиеся по наномасштабу, могут быть использованы для формирования упорядоченных конфигураций ферментов различных видов, а также для изготовления разнообразных функциональных наноприборов.

#### *Микрополяризаторы.*

Был изготовлен новый тип микрополяризатора на основе алюминия и никеля [31] при помощи методов анодирования и электроосаждения. За счет анизотропной структуры пленки анодированного алюминия в пленке легко создается решетка никелевых колонн, которые работают так же, как проволочный поляризатор. Изготовленный поляризатор проявлял коэффициент затухания более 30 на длине волны 1,3 мкм.

Микрооптические элементы на данный момент вызывают большой интерес для применения в оптической телекоммуникации и оптических сенсорах. Микрополяризатор – один из элементов, необходимых в таких оптических устройствах, как изоляторы и переключатели.

Авторы [31] предложили новый тип микрополяризатора на основе пленки анодированного алюминия ( $Al_2O_3$ ), который содержит множество цилиндрических микропор, ориентированных параллельно друг к другу. Общеизвестно, что эти поры могут быть заполнены металлическими материалами при помощи электроосаждения. Ожидается, что, имея подобные металлические проводники (Ni) в порах, пленка  $Al_2O_3$  будет работать как проволочный поляризатор, как показано на рис. 6.

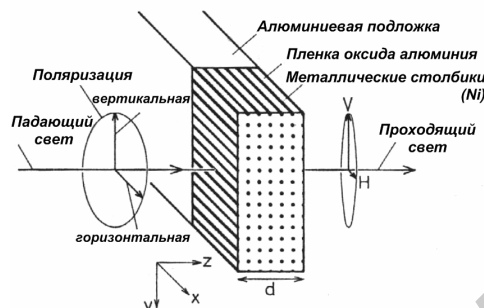


Рис. 6. Тип проволочного поляризатора, созданного на основе пленки оксида алюминия

Анодный  $Al_2O_3$ , содержащий микропоры столбчатой структуры, является весьма привлекательным материалом для использования его в оптических приборах. На сегодня анодные  $Al_2O_3$  пленки исследованы в качестве источников для создания композитных материалов. Были осуществлены различные оптические функции, такие как спектральная селекция, поляризация и оптическое переключение, путем заполнения пор такими материалами как металл, полимер.

Недавно было установлено, что анодная  $Al_2O_3$  пленка демонстрирует поляризационную функцию сама по себе без участия заполняющих поры материалов. Поляризационная функция объясняется предположением о наличии частиц неоксидированного Al путем химического анализа анодных  $Al_2O_3$  пленок.

#### *Микроканальные электронные умножители.*

В настоящее время микроканальные электронные умножители (или микроканальные пластины (MCP)) широко используются в усилителях яркости, в устройствах навигации, в электронно-оптических преобразователях, в измерительных приборах для научных исследований, в медицинском диагностическом оборудовании, в приборах ночного видения, в детекторах заряженных частиц и гамма-квантов и т.д. MCP обладают хорошими рабочими характеристиками: коэффициент усиления вплоть до  $10^6$ , время отклика 2 нс и менее, пространственное разрешение порядка диаметра канала, чувствительность вплоть до одноэлектронного режима, высокая устойчивость к воздействию радиации, способность работать в сильных магнитных полях.

MCP представляют собой матрицу параллельных микроканалов [32–34]. Каждый микроканал можно рассматривать как непрерывную диодную структуру, обладающую необходимым удельным сопротивлением и свойствами вторичной эмиссии. Авторы предлагают для производства MCP анодный оксид алюминия, который формируется электрохимическим окислением Al в электролитах, слабо растворяющих оксид алюминия, и состоит из регулярно расположенных гексагональных плотноупакованных ячеек, которые параллельны друг другу и перпендикулярны поверхности Al подложки. Каждая ячейка имеет пору, закрытую слоем барьерного оксида со стороны Al анода. Диаметр ячейки определяется главным образом напряжением анодирования и зависит от природы электролита, его температуры и концентрации, плотности тока и других параметров процесса анодирования. Диаметр пор можно также увеличить селективным травлением стенок ячейки. Анодный оксид алюминия является весьма подходящим материалом для микроканальных пластин благодаря наличию естественных микроканалов. Диаметры этих каналов находятся в диапазоне 0,02–0,5 мкм, причем каналы большего размера можно легко получить посредством дополнительной обработки, основанной на внутренней микроканальной структуре. Можно сформировать MCP с диаметрами каналов 0,2–8 мкм и толщиной 40–150 мкм.

Авторы [32–34] разработали способ производства МСР на основе анодного оксида алюминия, который включает следующие этапы: выращивание анодного  $Al_2O_3$  требуемой толщины; отделение пластины  $Al_2O_3$  от Al подложки; осаждение фотолитографической маски; защита нерабочей поверхности; травление  $Al_2O_3$  через защитную маску в многокомпонентных кислотных и щелочных травителях; освобождение матрицы МСР; отжиг матрицы МСР.

Анодный  $Al_2O_3$  представляет собой типичный диэлектрик, поэтому необходимо формировать проводящее и эмиссионное покрытие на стенках каналов МСР, чтобы ее можно было использовать в качестве электронного усилителя (умножителя). Это можно сделать путем осаждения оксидных пленок с подходящими свойствами на стенках каналов МСР.

#### *Пористый оксид как шаблон.*

В последние годы возрастает интерес к различным наноструктурным материалам, и, в первую очередь, к углеродным нанотрубочным материалам и металлам. Для изготовления подобных наноструктурных изделий используется метод, заключающийся в том, что в качестве шаблона применяется пористый материал с порами, обладающими наноразмерами. При использовании в качестве шаблона пористого анодного оксида алюминия с порами диаметром в несколько десятков нанометров, с помощью осаждения из газовой фазы (CVD) были синтезированы углеродные нанотрубки. Авторы [35, 36], обратив внимание на то, что в процессе карбонизации, происходящей при нагревании поливинилхлорида (PVC) и поливинилового спирта (PVA) в инертной среде, происходит переход в жидкое состояние, предприняли попытку синтезировать углеродную наноструктуру с помощью жидкофазного процесса путем нагрева пористого анодного оксида алюминия и этих полимеров, в результате чего была получена углеродная наноструктура со специфической ориентированностью.

Одной из многообещающих областей применения высоко упорядоченной матричной структуры ПОА являются функциональные оптические приборы [37, 38]. Среди этих применений значительный интерес вызывает использование идеально упорядоченного пористого оксида алюминия для изготовления двумерных (2D) фотонных кристаллов. 2D фотонные кристаллы, как установлено, обладают пространственно периодическим коэффициентом преломления с постоянной решетки одного порядка с длиной волны света, и потенциальными научными и технологическими возможностями применения, основанными на их уникальных свойствах светопропускания. Высокоупорядоченная нанопористая матричная структура анодного ПОА соответствует такой структуре с пространственно периодическим коэффициентом преломления для 2D фотонных кристаллов. Пористый оксид алюминия является полезным с точки зрения формирования пористой матричной структуры с высоким аспектным отношением, чего невозможно добиться с помощью таких традиционных процессов, как электронно-лучевая литография.

Свойства пропускания 2D фотонных кристаллов с четкой запрещенной зоной в спектре, основанных на высокоупорядоченных матрицах пор с однородным размером и высоким аспектным отношением пористого оксида алюминия, как ожидается, применимы для разработки функциональных оптических приборов, таких как волноводы и лазеры с низкими пороговыми величинами.

## **APPLICATION FEATURES OF POROUS ALUMINA**

V.A. SOKOL, V.A. JAKOVCEVA, D.L. SHIMANOVICH

### **Abstract**

This paper reviews the results of application of porous alumina formed using the electrochemical anodization process. Porous alumina is widely used in the microelectronics (i.e. anodized aluminum bases, systems of multilevel interconnections, aluminum packages for VLSIs and hybrid integrated circuits, etc.). Such oxides are also successfully used to form précised membranes, luminescent displays, light – emitting diode devices, biomolecule structures, micropolarizers, microchannel electron multipliers, templates, solar cells, etc.

## Список литературы

1. Сокол В.А. Дис. доктора техн. наук. Мн. МРТИ, 1988.
2. Лабунов В.А., Сокол В.А. Техника средств связи. 1988. Вып. 3. С. 30–39.
3. Сокол В.А., Воробьева А.И., Игнашев Е.П. Патент РБ №1998114. 1998.
4. Labunov V.A., Sokol V.A., Parkun V.M. et al. Pat. USA №5580825. 1993.
5. Lezenes S., Sokol V.A., Labunov V.A. Pat. USA №6069070. 2000.
6. Sokol V.A., Parkun V.M., Vorobyova A.I. et al. Pat. USA №5880021. 1999.
7. Сокол В.А. // Докл. БГУИР. 2004. №3. С. 18–26.
8. Сокол В.А. // Радиотехника и электроника. 1999. Вып. 23. С. 145–153.
9. Jtaya K., Sugawara S., Arai K. et al. // Engineering of Japan. 1984. Vol. 17, №5
10. Ryo J., Ko E., Kang J. et al. // Nanotechnol. 2007. №7 (11). P. 4190–4193.
11. Sokol V., Gaponenko S., Yakovtseva V. et al. // 12-th Internat. Conf. «Nano-Design, Tecnology, Computer Simulations», June 23–27. 2008.
12. Yakovtseva V., Litvinovich G., Sokol V. // «Physics Chemistry and Application of Nanostructures» May 26–29. 2009.
13. Bocchetta P., Conciauro F., Quarto F. et al. // Solid State Electrochemistry. 2007. Vol. 11, №9.
14. Suheil F. Abdo et al. Pat. USA №6.299.995. 2001.
15. Sharma G., Pishko M., Grimes C. // J. of Materials Science. 2007. Vol. 42, №13.
16. Hui Wang and Haowei Wang. Applied Surface Science. Vol. 249, Issues 1–4, 15 August 2005. P. 151–156.
17. Уэмия С., Хатакаяма Н., Кадзивара М. и др. // Хемен гидзюцу. 1997. Т. 48, №4.
18. Seung-Man Yang et al. Pat. USA №5.782.959. 1998.
19. Anthony Yu-Chung Ku et al. Pat. USA №7.396.382. 2008.
20. Miller S.J. et al. Pat. USA №7.138.006. 2006.
21. Engelen C.W.R., Van Leeuwen W.F. Pat. USA №5.591.345. 1997.
22. Kuei-Jang Chao et al. Pat. USA №6.060.415. 2000.
23. Kondo M. et al. Pat. USA №6.159.542. 2000.
24. Садока Е., Сакан Е. // Дэнки кагаку. 1982. Т. 50, №2.
25. Садока Е., Сакан Е. // Дэнки кагаку. 1983. Т. 51, №1.
26. Piero Perlo et al. Pat. USA №7.323.815. 2008.
27. Imanishi M. et al. Pat. USA №5.054.889. 1991.
28. Lambertini V. et al. Pat. USA №7.075.229. 2006.
29. Ping Sheng et al. Pat. USA №5.540.717 B2. 2009.
30. Масуда Х. // Осенний симпозиум Электрохимического общества. 2002. Япония. 2К19.
31. Saito M., Kirihara M., Taniguchi T. et al. // Appl. Phys. Lett. 1989. 55(7).
32. Emel'yanchik F. et al. // Applied Surface Science. 1997. P. 295–301.
33. Govyadinov J. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1998. A 419. P. 667–675.
34. Emeliantchik I.F. et al. // Selected Scientific papers of BSU. Minsk. 2001. P. 303–322.
35. Сато С., Хабадзаки Х., Конно Х. // 107 конференция Общества изучения технологий обработки поверхности. 05.02.2003.
36. Сато С., Хабадзаки Х., Конно Х. // 109 конференция Общества изучения технологий обработки поверхности. 06.02.2004.
37. Такадани К. // Аруминуму Кэнкю Кайси. 2003. №8.
38. Масуда Х., Нисю К., Баба Н. // Хемен гидзюцу. 1992. Т. 43, №8.

УДК 621.794.61:543.422

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ АНОДНЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С УТОЛЩЕННЫМ БАРЬЕРНЫМ СЛОЕМ $Al_2O_3$ : ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Г.В. ЛИТВИНОВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 14 октября 2011

В работе сформированы пористые пленки анодного оксида алюминия с утолщенным барьерным слоем  $Al_2O_3$ . С помощью рентгенофазового анализа и ИК-спектрофотометрии осуществлен контроль состава полученных образцов. Исследованы структура пор этих образцов, картина порозаполнения при формировании утолщенного барьерного слоя  $Al_2O_3$ , с привлечением для этой цели высокоразрешающей электронно-растровой микроскопии. Наблюдаемое пассивное усиление яркости в спектрах излучения системы подсветки при использовании сформированных нами пленок  $Al_2O_3$  объяснимо с точки зрения направленного перераспределения видимого электромагнитного излучения при прохождении света через пленку с такой строго упорядоченной нанопористой структурой. В исследуемых образцах измерена величина пробивного напряжения диэлектрической пленки  $Al_2O_3$  и произведено сопоставление ее с результатами, полученными в других электролитах.

*Ключевые слова:* алюминий, анодное оксидирование, пористые пленки анодного оксида алюминия, барьерный слой плотного  $Al_2O_3$ , порозаполнение, электронно-микроскопические снимки, оптические и рентгеновские спектры, напряжение пробоя пленки анодного оксида  $Al_2O_3$ .

### Введение

К диэлектрическим свойствам пористых анодных пленок оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) предъявляются часто высокие требования, а именно, большое значение пробивного напряжения ( $U_{пр.}$ ), малые токи утечки, устойчивость к высоким температурам и их стабильность и др. [1–3]. Напряжение пробоя пористых анодных пленок  $Al_2O_3$  в диапазоне малых толщин ( $d$ ), соответствующих нескольким десяткам микрометров, пропорционально величине  $d$ . При дальнейшем росте толщины пленки данное увеличение незначительное или даже отсутствует [4]. Известно, что значение пробивного напряжения пористых пленок  $Al_2O_3$  сразу после формирования путем электрохимического окисления (анодирования) алюминиевого образца не превышает 1,0–1,5 кВ. Для увеличения этого значения используются различные методы, скажем, заполнение пор наполнителем, к примеру, полиимидом или др. Учитывая, что при формировании пористой анодной пленки оксида алюминия всегда присутствует тонкий барьерный слой плотного  $Al_2O_3$ , прилегающий к металлу и пористому оксиду алюминия, имеется возможность варьировать его толщиной. Достигается это благодаря пропорциональной зависимости значения этой толщины от величины приложенного напряжения анодирования. С ростом же толщины барьерного слоя  $Al_2O_3$  наблюдается некоторое увеличение значения пробивного напряжения [4]. В данной работе после проведения процесса анодирования исходного алюминиевого образца в серноокислом электролите и получения на поверхности пористой пленки  $Al_2O_3$  заданных параметров, проведена дополнительная операция плотного оксидирования их в электролите барьерного типа. Данная операция преследовала цель максимально увеличить толщину барьерного слоя  $Al_2O_3$  в пористой оксидной пленке алюминия. Процесс формирования таких



пористых анодных пленок оксида алюминия с утолщенным барьерным слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , состав, структура и свойства полученных образцов были исследованы и результат изложен ниже.

### Экспериментальная часть

При выполнении эксперимента использовали алюминиевую фольгу А99,99 толщиной  $d=100$  мкм с поверхностью ~12 класса чистоты. Из нее вырезали образцы размером  $60 \times 60$  мм и в них создавали окна  $20 \times 35$  мм для анодирования, а остальную часть, за исключением еще контактных площадок для токоподвода, маскировали. Электрохимическое окисление образцов проводили в ванне с водным раствором серной кислоты (100 г/л  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) при постоянном напряжении формовки 20 В (потенциостатический режим), перемешивании электролита с поддержанием температуры, равной в данном случае  $12 \pm 1^\circ\text{C}$ . Образец, который служил анодом, крепился в Ti-держателе и перемещался в электролите, катодом же была Ni-пластина. Процесс анодирования осуществлялся только с лицевой стороны образца в его окнах. Временем анодирования задавалась толщина пористой анодной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и величина ее в наших исследованиях соответствовала ~60 мкм.

По завершении пористого анодирования образцов следовали промывка и дальнейшее плотное оксидирование в 1%-ном водном растворе лимонной кислоты. Напряжение медленно разворачивали до максимально возможной величины, обусловленной технической характеристикой используемого прибора, в нашем эксперименте равной 1100 В, затем образец выдерживали при этом значении до спада тока. Здесь уместно отметить важность выполненной ранее операции маскирования нерабочей части образца по причине возможного локального прогара и его порчи. После окончания процесса плотного оксидирования образец вновь подвергался мойке и с обратной его стороны в окнах удалялись маска и оставшийся слой алюминия.

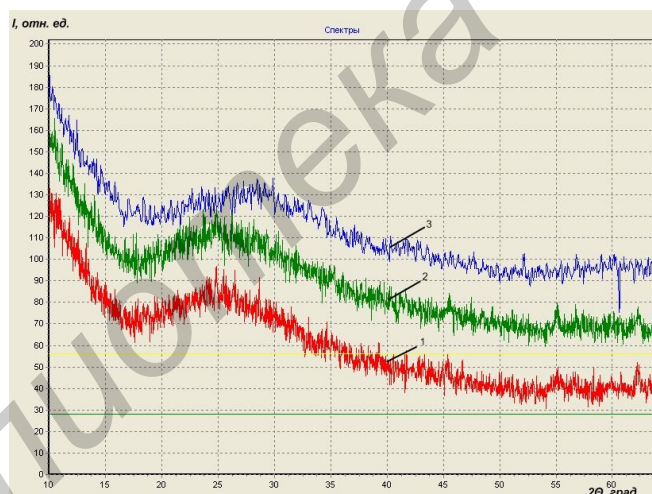


Рис. 1. Рентгеновские спектры пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 1 – пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  после обычного процесса пористого анодирования алюминия; 2 – пористая пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , прошедшая операцию формирования утолщенного барьерного слоя оксида алюминия; 3 – пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 285 мкм (в ~5 раз большей предыдущих)

Для контроля состава полученных образцов были использованы рентгенофазовый анализ и ИК-спекрофотометрия. Представляло интерес проверить наличие в этих образцах кристаллической фазы и убедиться, насколько использованные методы анализа окажутся чувствительны к столь малым ее возможным дозам. Для этого на приборе Дрон 4–13 в Си-излучении ( $K_\alpha=1,54178 \text{ \AA}$ ) при фокусировке Брэгга-Брентано и скорости развертки 0,5 град/мин в интервале углов  $2\theta=10\text{--}70$  град записаны спектры исследуемых образцов.

На рис. 1 приведены эти спектры пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Визуально очевидно, что представленные на рис.1 спектры не имеют существенных различий и мы фиксируем только характерную, в основном, для процесса анодирования аморфную фазу. Увеличение толщины пленки в ~5 раз (образец 3) не привело к заметным изменениям в спектре, а значит и в ее составе. Также различий не обнаружено в ИК-спектрах в диапазоне длин волн  $\lambda=2,5\text{--}25$  мкм, что подтверждает отмеченный выше результат.

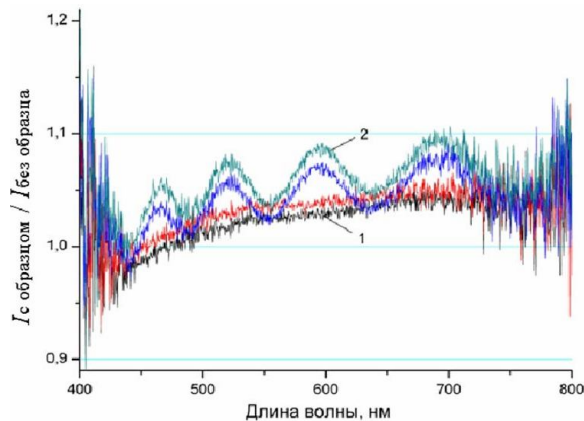


Рис. 2. Дифференциальные спектры излучения системы подсветки с пористыми анодными пленками  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 1 – пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  после обычного процесса пористого процесса анодирования алюминия; 2 – пористая пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , прошедшая операцию формирования утолщенного барьерного слоя оксида алюминия

1,32 мкм (показатель преломления  $n=1,56$ ). Применяемая на практике оценочная формула для толщины барьерного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [7]:

$$d_{\text{б.с.}} = kU_a,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $U_a$  – напряжение анодирования) дает при  $k=1,3$  нм/В и  $U_a=1100$  В величину  $d_{\text{б.с.}}=1,43$  мкм, близкую к рассчитанной выше.

С помощью полученных электронно-микроскопических снимков исследовалась структура сформированных в работе пористых пленок анодного  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . На рис. 3 представлены СЭМ-изображения поперечного сечения пористой анодной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с дополнительно сформированным утолщенным барьерным слоем (образец 2). Как видно из рис. 3,а, на котором просматривается поперечное сечение всей пленки и приведена ее толщина, хорошо заметен плотный барьерный слой, а под большим углом – пористая сторона образца. Пронизывающие пленку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  вертикальные поры представлены на рис. 3,б: их средний диаметр равен 12 нм, а толщина стенок между порами соответствует приблизительно двум диаметрам пор. Рис. 3,в демонстрирует утолщенный барьерный слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в пористой анодной пленке оксида алюминия, измеренная толщина которой равна 1,35 мкм. Эта величина хорошо согласуется со значениями, изложенными ранее. Следует подчеркнуть наличие четко выраженной границы раздела пористый-плотный оксид алюминия в наблюдаемом нами процессе порозаполнения.

Важным фактором из спектров излучения в диапазоне длин волн 0,4-0,8 мкм (рис. 2) является то, что пористая пленка с утолщенным барьерным слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (обр. 2) толщиной 1,35 мкм сохраняет пассивное усиление, аналогично образцу 1. Упомянутый фактор обусловлен, скорее всего, тем, что участие в измерениях пленки (подложки) анодного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  со строго упорядоченной нанопористой структурой приводит к гашению видимого электромагнитного излучения в направлениях, лежащих в плоскости подложки. Этим достигается улучшение экстинкции света с подложки и увеличение направленности распространения света. В целом, подобные сведения приближают нас к окончательному пониманию механизма наблюдаемого эффекта и позволяют найти его оптимальные варианты.

Для измерения напряжения пробоя, важного электрофизического параметра алюминиевых оснований с диэлектрическим слоем анодного  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , использовался прибор, позволяющий фиксировать пробивное напряжение  $U_{\text{пр}}$  с рабочим диапазоном до 10 кВ. Прибор представляет собой управляемый высоковольтный источник с возможностью плавно нарастающей развертки напряжения до электрического пробоя, который фиксировался автоматически. Контроль электрического пробоя осуществлялся встроенным и внешним измерительными блоками. Значение пробивного напряжения полученных образцов в сернокислом электролите с последующим порозаполнением за счет роста утолщенного барьерного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  уступают подобным, полу-

На рис. 2 приведены оптические спектры пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в видимом диапазоне  $\lambda=0,4-0,8$  мкм, измеренные аналогично работе [2]. Спектры излучения системы подсветки с пленками 1 и 2 записаны при падающем излучении сначала на одну, а затем другую сторону образца, т.е. со стороны открытых пор и барьерного слоя. Рисунок иллюстрирует влияние расположения сторон образца на интенсивность прошедшего сигнала. Подобно ранее изложенным данным [5], для образцов 1 и 2 на выходе мы имеем пассивное усиление интенсивности прошедшего излучения. Кроме того, для образца 2 из-за утолщенного барьерного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  мы наблюдаем интерференцию. Используя формулу расчета [6] и сведения из интерференционной картины вычисленная толщина этого барьерного слоя составила

ченным в щавелевой кислоте, и не превышают  $\sim 2$  кВ. Преобразование аморфной фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  исследуемых образцов в кристаллическую  $\gamma$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которое осуществлялось термообработкой при  $830^\circ\text{C}$  продолжительностью 30 мин, ощутимо не сказалось на их токах утечки и  $U_{\text{пр}}$ .

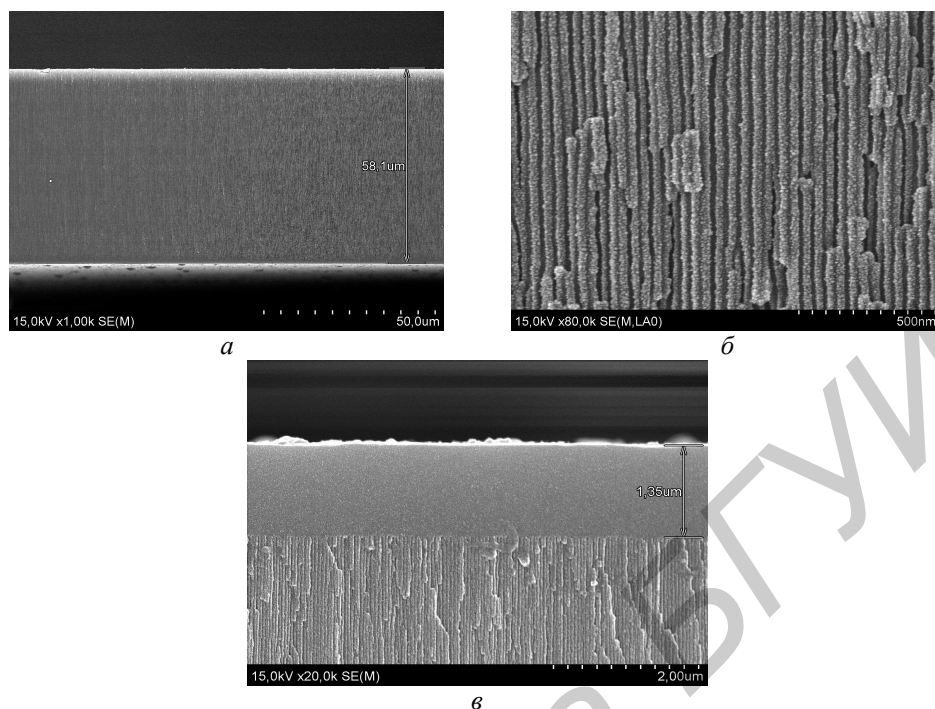


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки поперечного сечения пористых анодных пленок оксида алюминия с утолщенным барьерным слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$

### Результаты и их обсуждение

Изложенные здесь сведения позволяют утверждать, что формирование утолщенного барьерного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при  $U=1100$  В в пористых пленках анодного оксида алюминия не привело к изменению состава (в пределах чувствительности используемых для контроля методов). Если учесть, что эти изменения относятся в первую очередь к тонкому барьерному слою  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а еще добавить малость самой величины, то сказанное может послужить объяснением конечного результата. При повторном плотном оксидировании алюминия через поры пористого оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$  мы наблюдаем процесс порозаполнения. При смене электролита и при превышении напряжения формовки  $U_a$  пористого оксида начинает увеличиваться толщина барьерного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [8] и пора начинает заполняться плотным оксидом. Это подтверждается литературными данными, где также в ходе вторичного формирования по мере увеличения продолжительности электролиза отмечается процесс заполнения пор, обусловленный образованием новых порций окислов. В процессе вторичного формирования ионы  $\text{Al}^{3+}$  переносятся сквозь барьерный слой в направлении металл→раствор, а ионы  $\text{O}^{2-}$  – в направлении раствор→металл, в результате чего происходит образование окислов на поверхностях раздела раствор – барьерный слой (в донной части пор) и барьерный слой – металл, соответственно. Рассчитанные числа переноса сквозь барьерный слой ионов  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{O}^{2-}$  равны 0,4 и 0,6, соответственно. Т.е., проявляется преимущественная роль в процессе переноса отрицательных ионов кислорода.

Следует отметить, что применение строго упорядоченных нанопористых структур типа пористых анодных пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в светоизлучательных приборах позволяет добиваться оптимальной направленности видимого электромагнитного излучения.

Из исследований пробивных напряжений вытекает, что более высокими значениями  $U_{\text{пр}}$  обладают пленки, сформированные в водном растворе щавелевой кислоты. Пористые пленки анодного  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , сформированные в сернокислом электролите, имеют малый диаметр каналов, большую активную адсорбирующую поверхность, включая такие встроенные продукты электролиза, как  $\text{SO}_4^{2-}$ , что в целом приводит к значительным токам утечки и меньшим величинам пробивных напряжений.

## Заключение

Таким образом, из выполненных исследований можно видеть, что при вторичном формировании утолщенного барьерного слоя  $Al_2O_3$  в пористой пленке анодного оксида алюминия протекает процесс порозаполнения. Используемые при этом высокие значения напряжения при анодировании не нарушают вначале сформированную аморфную фазу анодного оксида алюминия (в пределах чувствительности применяемых методов контроля). Величины толщин барьерного слоя оксида алюминия, измеренные и расчетные, хорошо согласуются между собой. Одновременно важным моментом в спектрах излучения системы подсветки с исследуемыми образцами для длин волн 0,4–0,8 мкм является пассивное усиление интенсивности прошедшего света и отсутствие, в нашем случае, существенного влияния на него утолщенного барьерного слоя  $Al_2O_3$ . В вопросе, касающемся величины пробивного напряжения анодных пленок  $Al_2O_3$ , в случае необходимости требуется учесть электролит анодирования и метод порозаполнения.

Автор выражает благодарность сотруднику института физики Прислопскому С.Я. за оказанную помощь в получении спектров излучения системы подсветки с исследуемыми образцами.

## WITH THICK $Al_2O_3$ BARRIER LAYER: INVESTIGATIONS OF THEIR COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES

G.V. LITVINOVICH

### Abstract

Porous anode alumina oxide films with thick  $Al_2O_3$  barrier layer were formed. The composition of the control sample was performed by means of X-ray-phase and IR-spectrophotometer analysis. The structure of pores in these samples and picture of the filling of pores were studied under formation of the thickened  $Al_2O_3$  barrier layer with use of the electronic-raster microscopy with high resolution. Observed passive reinforcement of intensity in radiation spectrum of the system illumination with formed  $Al_2O_3$  films may be explained with standpoint of the directed redistribution of the visible electromagnetic radiation in the process of the light passing through the film with strictly ordering nanoporous structure. The value of break-voltage was measured and results were compared with these values for other electrolytes.

### Список литературы

1. Сокол В.А. Электрохимическая технология гибридных интегральных микросхем. Мн., 2004.
2. Осинский В.И., Вербицкий В.Г., Мацкевич В.М. и др. // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники». 2008. Ч 1. С. 92–96.
3. Рахман Танасис // Полупроводниковая светотехника. 2009. №1. С. 24–25.
4. Шиманович Д.Л., Литвинович Г.В., Сокол В.А. // Труды международной научно-технической конференции и молодежной школы-семинара «Нанотехнологии-2010». Таганрог. 2010. Ч.1. С.225–230.
5. Yakovtseva V., Litvinovich G., Sokol V. // «Physics, Chemistry and application of nanostructures». Proceedings of the International Conference Nanomeeting – 2009. Minsk, Belarus 26-29 May 2009. P. 613–616.
6. Васильева И.А., Филаретов Г.А., Яковлев А.С. // Обзоры по электронной технике. 1978. Сер.3 Микроэлектроника. Вып. 4 (603).С. 46.
7. Лыньков Л.М., Мухоров Н.И. Микроструктуры на основе анодной алюмооксидной технологии. Мн., 2002.
8. Мидзуки И., Кондо Т., Нисио К. и др. // Доклад на 117-ой конференции «Общества изучения технологий обработки поверхностей». 2008. 14В-10. P. 203–204.

УДК 004.72

## ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ НА ОСНОВЕ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ОБСЛУЖИВАНИЯ

А.В. ТРУХАН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 22 декабря 2011*

Предлагается решение задачи целочисленного линейного программирования для оптимальной маршрутизации информационных потоков в сетях телекоммуникаций. Рассмотрены вопросы обеспечения живучести компьютерных сетей при заданном уровне качества обслуживания.

*Ключевые слова:* качество обслуживания, живучесть компьютерной сети, оптимальная маршрутизация, телекоммуникационные сети.

### Введение

При достижении заданного уровня отказоустойчивости функционирования элементов сети телекоммуникаций одной из главных проблем обеспечения гарантированного качества предоставляемых услуг является определение маршрутов, которые удовлетворяли бы QoS-требованиям [1–7]. Однако выбранный самый короткий путь не всегда является оптимальным. На практике гораздо важнее не столько длина телекоммуникационного пути, сколько выбор такого пути, при котором обеспечивались бы заданные пропускные способности каналов при минимальной стоимости передачи единицы потока информации. Одновременно к требованиям обеспечения заданных пропускных способностей и минимальной стоимости передачи информации добавляются требования QoS сетей телекоммуникаций. В такой постановке проблема нахождения оптимального пути между источником и конечным узлом, при котором бы обеспечивалось заданное качество обслуживания и при этом стоимость передачи единицы потока была минимальной, специалистами изучена недостаточно полно.

Даны узлы сети в некоторых географических точках и прогнозируемые потребности (спрос) емкости каналов связи при передаче данных. Также даны множества возможных технологий для сетей передачи данных. В условиях ограниченных ресурсов необходимо сделать следующее. Решить, какие узлы связать физическими линиями. Выбор топологии нужно осуществлять в определенном классе сетей: звездообразных, древовидных, иерархических, т.е. зафиксировать тип структуры. Необходимо также определить для каждой линии ее тип и пропускную способность.

Далее показано, что для решения этой проблемы можно использовать одну математическую модель.

Основное же требование при проектировании сетей телекоммуникаций состоит в следующем: сеть должна быть надежна, иметь низкую стоимость, быть простой в эксплуатации, удовлетворять прогнозные потоки (требования) между конечными узлами, обеспечивать заданное качество предоставляемых услуг (Quality of Service – QoS).

## Выбор топологии и технологий сетей телекоммуникаций для обеспечения заданного качества обслуживания

Пусть  $V$  есть множество всех узлов проектируемой телекоммуникационной сети, т.е. множество  $V$  состоит из узлов логической телекоммуникационной сети (станции, маршрутизаторы, коммутаторы, мосты, хост-системы, внешние сети, средства спутниковой связи и т.д.) [8].

Задан граф требований  $H=(V, D)$  [8], содержащий ребро  $(s, t) \in D$  всякий раз, когда имеется требование для передачи данных между  $s$  и  $t$ . Для каждого требования  $(s, t) \in D$  графа  $H$  задается положительное число  $d(s, t) \in Z_+$ , которое называется *функцией трафика* и рассматривается как средний суммарный объем информации между узлами  $s$  и  $t$ , определенный статистически на основе прогноза роста информационных потоков [8].

В задаче проектирования топологии сети по графу требований  $H$  необходимо определить граф топологии  $G=(V, E)$  (рис. 1). Можно считать, что множества вершин у обоих графов совпадают. Вершинам графа  $G$  соответствуют узлы телекоммуникационной корпоративной сети, а ребрам – множество каналов связи, которые потенциально могут быть использованы (существуют на текущий момент либо могут быть проложены); например, оптоволокно, медные линии, радиоволновые линии, спутниковые каналы и т.д. Если между двумя узлами сети имеется несколько различных линий связи, то они представляются параллельными ребрами, отвечающими разным технологиям: Ethernet, Frame Relay, ISDN, ATM и т.д.

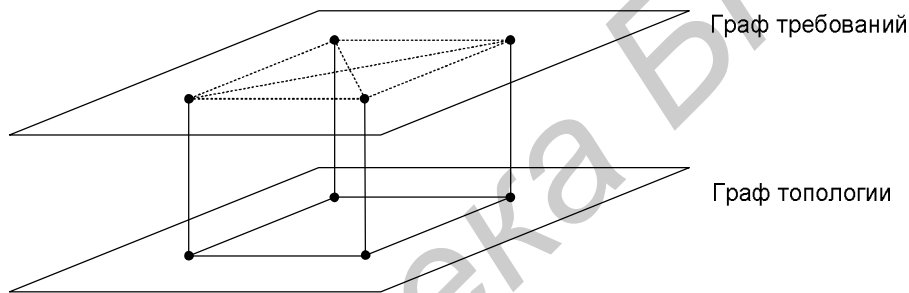


Рис. 1. Постановка задачи

Под пропускной способностью  $u(e)$  канала  $e \in E$  понимаются как возможные физические пропускные способности линий (при использовании выделенных и коммутируемых линий связи для осуществления соединений типа «точка-точка» между узлами сети), так и скорость, на которой может осуществляться подключение к глобальной сети общего пользования.

В информационных сетях каждый канал связи при передаче информации ориентирован: один узел передает информацию, а другой принимает. Установление линии связи между  $i$  и  $j$  позволяет передать некоторое количество информации в единицу времени между  $i$  и  $j$  и такое же количество информации между  $j$  и  $i$ , если подключение синхронное, и суммарное (от  $i$  к  $j$  + от  $j$  к  $i$ ) количество информации, если подключение асинхронное.

Различают два случая сформулированной задачи: проектирование топологии и технологии телекоммуникационной сети и модернизация топологии и выбор технологии существующей сети. При этом, как будет показано ниже, существуют математические модели, которые являются общими для обоих случаев. Для этого можно считать, что каждому ребру  $e$  графа топологии  $G$  изначально приписана начальная пропускная способность  $C_0(e) \in Z_+$ ,  $e \in E$ . Она отражает настоящее состояние каналов связи между вершинами, соединенными ребром  $e$ . Если на сегодняшний день таких каналов связи нет, то полагаем  $C_0(e)=0$ .

Пусть каждый канал  $(s, t) \in E$  определяется посредством соответствующего весового вектора с компонентами  $m$  аддитивных QoS-канальных весов  $w_i(s, t) \geq 0$  для всех  $1 \leq i \leq m$  [8, 9]. Для аддитивных QoS-параметров вес пути  $P=n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow \dots \rightarrow n_{h+1}$ , состоящего из  $h$  узлов (каналов), равен вектор-сумме весов составляющих его каналов, где  $n$  – длина хопа,  $h$  – число хопов в пути:

$$\vec{w}(P) = \sum_{j=1}^h \vec{w}(n_j, n_{j+1}). \quad (1)$$

Далее в [1] производится выбор нескольких кратчайших путей от некоторого источника до конечного узла, удовлетворяющих критериям QoS, а затем проводится оптимизация по одному критерию – стоимости.

Отличие данного исследования от результатов, изложенных в [1], состоит в том, что оптимизация выбора пути проводится одновременно по двум критериям – стоимости и обеспечению заданного качества обслуживания, т.е. QoS.

Задачи выбора топологии и технологий телекоммуникационной сети можно классифицировать по следующим признакам пропускных способностей дуг:

- без ограничений на пропускные способности (предполагается, что пропускных способностей стандартных линий связи будет вполне достаточно);

- непрерывные пропускные способности, т.е.  $y_e$  принимает значения из интервала  $[C_{\min}, C_{\max}]$ ;

- дискретные пропускные способности, т.е.  $y_e$  принимает одно из конечного множества  $C_0, C_1, \dots, C_k$ ;

- кратные пропускные способности, т.е.  $\{C_0, kC_0, k^2C_0, k^3C_0, \dots\}$

В современных технологиях непрерывные пропускные способности редко встречаются на практике. Значительно чаще каналы связи имеют дискретные или кратные пропускные способности [8].

Задано множество технологий  $T = \{\tau_1, \dots, \tau_n\}$  (коммутируемая линия, выделенная линия, оптоволоконная линия, подключение к общественной сети). Каждой технологии  $\tau \in T$  соответствует базисная пропускная способность  $C_\tau$ .

Обозначим через  $P(u; s, t)$  множество всех путей из  $s$  в  $t$  ( $u$  показывает операционное состояние сети, при  $u=0$  все узлы и ребра являются работоспособными) в графе  $G=(V, E)$ . Конкретный путь  $P$  из  $P(0; s, t)$ , содержащий ребро  $e$  (или вершину  $u$ ), обозначим  $P \in P(0; s, t); e \in P, u \in P$ . Пусть  $f(0; s, t; P)$  – величина потока типа  $(s, t)$  вдоль пути  $P \in P(0; s, t)$ .

По аналогии с [7] введем понятие стоимости передачи единицы потока по пути  $P \in P(0; s, t)$  для требования  $(s, t)$  как

$$K(s, t; P) = \sum_{e \in P} K(s, t; e), \quad (2)$$

где  $K(s, t; e)$  – стоимость передачи по дуге  $e$  единицы информации.

В работе [8] задача проектирования оптимальной телекоммуникационной сети представлена в виде следующей модели:

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} K(s,t,e) f(0; s, t; P) \rightarrow \min. \quad (3)$$

В выражении (3) оптимизация производится по критерию стоимости. Запишем задачу оптимизации по критериям стоимости с учетом обеспечения QoS.

Введем функцию  $F_i(s, t)$ , которая характеризует длину пути и зависит от  $m$  ограничений  $L_i$ , где  $L_i$  есть ограничения, обеспечивающие заданное качество обслуживания: полосу пропускания, время ответа конечных узлов, вариации времени ответа, количество потерянных пакетов. В данном случае  $m=4$ . Необходимо отметить, что перечень ограничений, обеспечивающих заданный уровень качества обслуживания, может быть расширен и дополнен.

Итак,

$$F_i(s, t) = w_i(s, t) / L_i \text{ для всех } 1 \leq i \leq m \text{ } i - \text{ целое число.} \quad (4)$$

По аналогии с [8] используя  $F_i(s, t)$ , задача выбора оптимальной топологии по критериям стоимости и QoS для дискретных пропускных способностей может быть представлена в виде следующей задачи целочисленного линейного программирования:

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} K(s,t,e) f(0; s, t; P) F_i(s, t) \rightarrow \min, \quad (5)$$

для всех  $1 \leq i \leq m$   $i$  – целое число;

$$y(e) = \sum_{\tau=0}^{T(e)} C_{\tau}(e)x_{\tau}(e), \quad \forall e \in E,$$

$$1 = x_0(e) \geq x_1(e) \geq \dots \geq x_{T(e)}(e) \geq 0, \quad x_{\tau}(e) \in \{0, 1\}, \quad \tau = \overline{1, T(e)}, \quad \forall e \in E,$$

для синхронных линий:

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} f(0; s, t; P) \leq y(e), \quad \forall e \in E,$$

для асинхронных:

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} f(0; s, t; P) \leq y(e), \quad \forall e \in E^+ \text{ для прямых дуг;}$$

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} f(0; s, t; P) \leq y(e), \quad \forall e \in E^- \text{ для обратных дуг;}$$

$$\sum_{P \in P(0,s,t)} f(0; s, t; P) = d(s, t) \text{ для всех } (s, t) \in D,$$

$$f(0; s, t; P) \geq 0 \text{ для всех } (s, t) \in D \text{ и } P \in P(0; s, t).$$

Предполагается, что каждое ребро  $e \in E$  графа топологии уже оборудовано начальной пропускной способностью  $C_0(e)$  (возможно  $C_0(e)=0$ ), которая называется исходной пропускной способностью. Так как предполагается, что пропускная способность  $C_0(e)$  установлена изначально, то полагается  $x_0(e)=1$ . Выбор пропускной способности  $C_{\tau}(e)$ ,  $0 \leq \tau \leq T(e)$  для ребра эквивалентен тому, что  $x_0(e)=x_1(e)=\dots=x_{\tau}(e)=1$  и  $x_{\tau+1}(e)=\dots=x_{T(e)}(e)=0$ .

Задача выбора оптимальной топологии сети по критериям стоимости и QoS для кратных пропускных способностей каналов связи аналогично может быть представлена в виде следующей задачи линейного программирования:

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} K(s, t; e) f(0; s, t; P) F_i(s, t) \rightarrow \min, \quad (5')$$

для всех  $1 \leq i \leq m$   $i$  – целое число,

$$y(e) = C_0(e) + \sum_{\tau \in T(e)} C_{\tau}(e)x_{\tau}(e),$$

$$0 \leq x_{\tau}(e) \leq u_{\tau}(e), x_{\tau}(e) \text{ – целые для всех } e \in E \text{ и всех } \tau \in T(e),$$

для синхронных линий:

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} f(0; s, t; P) \leq y(e), \quad \forall e \in E,$$

для асинхронных:

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} f(0; s, t; P) \leq y(e), \quad \forall e \in E^+ \text{ для прямых дуг;}$$

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} f(0; s, t; P) \leq y(e), \quad \forall e \in E^- \text{ для обратных дуг;}$$

$$\sum_{P \in P(0,s,t)} f(0; s, t; P) = d(s, t) \text{ для всех } (s, t) \in D,$$

$$f(0; s, t; P) \geq 0 \text{ для всех } (s, t) \in D \text{ и } P \in P(0; s, t).$$

Если необходимо сформулировать дополнительные условия, при которых будет обеспечиваться заданный уровень живучести при использовании различных стратегий (например,



перемаршрутизации, разнообразия или резервирования), в представленные выше модели необходимо добавить соответствующие ограничения, приведенные в [1].

### Маршрутизация информационных потоков для обеспечения заданного качества обслуживания

Задача маршрутизации будет сформулирована как задача о мультипотоках в сети с дискретными или кратными пропускными способностями  $y(e)$ .

$$\sum_{(s,t) \in D} \sum_{P \in P(0,s,t); e \in P} K(s,t,e) f(0;s,t,P) \rightarrow \min$$

Мультипоток в сети  $G$  называется множество неотрицательных чисел [8];

$$f(s,t,e) > 0, e \in E, (s,t) \in D, \quad (6)$$

поставленных в соответствие для каждого требования  $(s,t)$  каждой дуге  $e$  и удовлетворяющих следующим линейным ограничениям (уравнения баланса мультипотока):

$$\sum_{e \in E_{in}(v)} f(s,t,e) - \sum_{e \in E_{out}(v)} f(s,t,e) = \begin{cases} -Z, v = s, \\ 0, v \neq s, t, \quad \forall v \in V, (s,t) \in D. \\ Z, v = t, \end{cases} \quad (7)$$

Первая сумма берется по дугам  $e$ , ведущим в узел  $v$ , а вторая сумма – по дугам  $e$ , ведущим из узла  $v$ . Вектор  $(Z: (s,t) \in D)$  называется величиной мультипотока.

Также необходимо добавить ограничения на пропускные способности ребер (для синхронных технологий):

$$\sum_{(s,t) \in D} f(s,t,e) \leq y(e), \forall e \in E \quad (8)$$

или ограничения на пропускные способности дуг (для асинхронных технологий):

$$0 \leq \sum_{(s,t) \in D} (f^+(s,t,e) + f^-(s,t,e)) \leq y(e), \forall e \in E, \quad (8')$$

которые выражают тот факт, что суммарная величина потоков всех типов в обоих направлениях по любому ребру не может превосходить пропускной способности этого ребра.

Для маршрутизации по критериям QoS к вышеописанным функциям необходимо также добавить ограничение для обеспечения QoS. Для различных параметров QoS (задержка передачи пакетов данных, пропускная способность, вероятность потери пакетов данных и т.д.) будут соответствующие ограничения. В качестве примера рассмотрим наиболее распространенный параметр, обеспечивающий QoS, задержку передачи пакетов.

Пакеты выстраиваются в очередь, формируемую буфером маршрутизатора. Очень важным является закон обслуживания поступающих заявок. Описание очереди в системе с задержками передачи данных возможно упростить при использовании модели M/M/1. Как следует из формулы Клейнрока для средней задержки пакета [9, 10], ограничения должны быть следующими:

$$\frac{1}{\gamma} \sum_{e \in E} f(s,t,e) \left[ \frac{1}{y(s,t,e) - f(s,t,e)} + \mu(P_e + K_e) \right] \leq T_{\max}(s,t) \text{ для всех } (s,t) \in D \quad (9)$$

где:  $T_{\max}(s,t)$  – максимально допустимая задержка;  $1/\mu$  – средняя длина пакета (биты/пакет);  $P_e$  – задержка передачи пакета по дуге  $e$ ;  $K_e$  – задержка связанная с обработкой пакета в узлах дуги  $e$ ;  $\gamma$  – полный трафик в сети (пакеты/секунда).

Существуют способы определения максимально возможной задержки. Как один из вариантов, возможно определить задержку эмпирически. Например, соответствующую требованиям какого-либо приложения. В [11] предложены алгоритмы определения максимальной за-

держки каждого маршрута, состоящего из любых дуг, а также сети в целом. Представленная функция могла быть более сложной и включать кроме задержек и другие требования QoS например, стоимость задержки для каждой ссылки дуги  $e$  [11]:

$$KT(s,t,e) = \beta \frac{f(s,t,e)}{y(s,t,e) - f(s,t,e)} \quad (10)$$

где  $KT(s,t,e)$  – стоимость задержки для дуги, принадлежащей  $(s,t)$ ,  $\beta$  – стоимостной коэффициент.

### Заключение

Представлена оптимизация выбора топологии сетей телекоммуникаций для маршрутизации информационных потоков с учетом требований обеспечения функциональности, минимальной стоимости передачи информации и заданного качества обслуживания. Разработанные модели отличаются от известных (например, представленных в [1]) тем, что при выборе оптимального пути с точки зрения минимальной стоимости единицы передаваемой информации учитывается также требование обеспечения заданного качества обслуживания (5), (5').

Полученные результаты в виде задач и моделей в совокупности составляют теоретическую основу для дальнейшего развития теории моделирования и оптимизации сетей и систем, разработки оптимальной структуры сетей телекоммуникаций.

Обеспечение необходимого качества обслуживания в компьютерных сетях может быть достигнуто путем выбора соответствующего пути между узлами. При этом сам путь не обязательно должен быть самым коротким в терминах длины. Более важным является обеспечение необходимого качества обслуживания, т.е. выполнение условия (1), при минимальной стоимости передачи единицы информации (3).

## THE MODELS OF MAINTENANCE OF THE SET QUALITY OF SERVICE IN NETWORKS OF TELECOMMUNICATIONS

A. V. TRUKHAN

### Abstract

Optimal choice of topology in telecommunications networks is presented. Routing models of information streams which maintain quality of service is presented. Optimal designing models of telecommunications network topology for information streams routing by two criteria – cost and quality of service are offered.

### Список литературы

1. Листопад Н.И. // Информатика. 2006. №4 (12). С. 39–50.
2. Копачев А.Г. // Информатизация образования. 2004. №4. С. 59–70.
3. Матрук А.А. // Информатизация образования. 2005. №3. С. 81–83.
4. Stoica H.Lira // In proc. of NOSSDAV'98. 1998. P. 167–203.
5. Floyd S. // IEEE ACM transactions on networking. 1995. Vol. 3, №4. P. 365–386.
6. Floyd S. // IEEE ACM transactions on networking. 1993. Vol. 1, №4. P. 397–413.
7. Mieghem P. // Computer Networks. 2001. Vol. 37, №3–4. P. 407–423.
8. Листопад Н.И. Моделирование и оптимизация глобальных сетей. Минск, 2000.
9. Quality of Service Routing [Electronic resource]. Mode of access: [www.nas.its.tudelft.nl/people/Piet/papers/chap2qosroutingfinal.pdf](http://www.nas.its.tudelft.nl/people/Piet/papers/chap2qosroutingfinal.pdf).
10. Girlich E., Kovalev M.M., Listopad N.I. Optimal choice of the capacities of telecommunication networks to provide QoS-Routing. 2009. №21. P. 14.
11. Resende M., Pardalos P. // Springer Science-t-Business Media. 2006. P. 1134.

УДК 621.396

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ АКТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С РАЗНОЙ ФОРМОЙ РАСКРЫВА ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ

О.А. ЮРЦЕВ, А.П. ЮБКО, Д.В. МОСКАЛЕВ, Н.М. НАУМОВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 22 декабря 2011

Сравниваются активные антенные решетки с прямоугольной, эллиптической и восьмиугольной формами раскрыва по мощности излучения при ограничении на максимальную мощность излучения одного приемо-передающего модуля. Условия сравнения: максимальная мощность излучения одного приемо-передающего модуля, основные параметры диаграммы направленности и коэффициент направленного действия одинаковы в решетках с разной формой раскрыва.

*Ключевые слова:* активная антенная решетка, форма раскрыва, энергетический показатель, численное моделирование.

### Введение

При проектировании антенных решеток задаются требования к электрическим характеристикам и параметрам. Основными из них являются ширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН) –  $2\theta_{0,5}$ , уровень максимального бокового лепестка –  $F_{bm}$ , средний уровень бокового излучения –  $F_{bs}$ , коэффициент направленного действия (КНД). Эти параметры зависят от амплитудного распределения возбуждения излучателей решетки (АР) и формы раскрыва решетки. В активных антенных решетках каждый излучатель в режиме передачи является нагрузкой своего усилителя мощности, и требуемое АР устанавливается изменением коэффициентов усиления усилителей. При спадающем к краям решетки АР, которое используется для уменьшения уровня боковых лепестков, в режиме максимальной мощности работает только один центральный или группа центральных усилителей. Поэтому общая мощность излучения уменьшается по сравнению с максимальной, соответствующей равномерному АР. В работе [1] решена задача синтеза амплитудного распределения возбуждения для линейной решетки, при котором потери мощности на излучение минимальны при заданном уровне боковых лепестков. В настоящей работе рассматривается вопрос об уменьшении потерь мощности путем выбора формы раскрыва решетки. Известно, что в решетках с формой раскрыва, отличной от прямоугольной, уровень боковых лепестков меньше, чем в прямоугольной, при одном и том же АР. В таких решетках заданный уровень боковых лепестков может быть обеспечен амплитудным распределением, более равномерным, что приведет к росту общей мощности излучения. С целью количественной оценки возможного энергетического выигрыша за счет изменения формы раскрыва проведено численное моделирование решеток с разной формой раскрыва – прямоугольной, эллиптической, восьмиугольной и сравнение их по следующему предлагаемому энергетическому показателю  $K_e = P_s / P_{1\max}$ , где  $P_s$  – полная мощность излучения решетки,  $P_{1\max}$  – максимальная мощность излучения одного приемо-передающего модуля активной решетки (ППМ).

## Методика теоретического анализа

Анализ производится численно. Для расчета ДН используется известное выражение [2]:

$$f(\theta, \varphi) = f_1(\theta, \varphi) \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \cdot \exp(i\Psi_{mn}) \exp(ik \cdot \delta r) \right|, \quad (1)$$

где  $f_1(\theta, \varphi)$  – ДН одного излучателя;  $\theta, \varphi$  – угловые координаты точки наблюдения в пространстве дальней зоны (угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к плоскости решетки);  $M, N$  – число строк и столбцов решетки;  $m, n$  – номера строк и столбцов решетки;  $A_{mn}, \Psi_{mn}$  – нормированная к максимуму амплитуда и начальная фаза возбуждения излучателя, стоящего на пересечении строки с номером  $m$  и столбца с номером  $n$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число свободного пространства;  $\lambda$  – длина волны;

$$\delta r = (m-1)D_m \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + (n-1)D_n \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi, \quad (2)$$

где  $D_m, D_n$  – расстояния между соседними излучателями вдоль строк и столбцов.

Спадающее к краям решетки комбинированное амплитудное распределение  $A_{mn}$  задавалось в виде [3]:

$$A_{mn} = \left[ \Delta_m + (1 - \Delta_m) \sin^{P_m} \left( \pi \frac{m-1}{M-1} \right) \right] \left[ \Delta_n + (1 - \Delta_n) \sin^{P_n} \left( \pi \frac{n-1}{N-1} \right) \right], \quad (3)$$

где  $\Delta_m (\Delta_n)$  – уровни возбуждения крайних излучателей в строке (в столбце);  $P_m (P_n)$  – числа, характеризующие скорость спада амплитудного распределения от центра решетки к краю строки (столбца).

Фазовое распределение возбуждения излучателей считалось равномерным ( $\Psi_{mn}=0$ ). Сетка расположения излучателей – прямоугольная. Расстояние между соседними излучателями в строке и в столбце одинаково и равно  $D_m = D_n = D_0 = 0,57\lambda$ , что обеспечивает выполнение условия единственности главного максимума ДН при электронном сканировании в секторе углов  $\pm 40^\circ$ . В качестве излучателя использован полуволновый симметричный резонансный вибратор с линейным рефлектором. Диаграмма направленности одного излучателя  $f_1(\theta, \varphi)$  рассчитана методом моментов с использованием интегрального уравнения Поклингтона для тока в тонком проводнике [4]. При расчете  $f_1(\theta, \varphi)$  учтено влияние на активный излучатель с номером  $(n, m)$ , стоящий на пересечении строки с номером  $m$  и столбца с номером  $n$ , двумя кольцами окружения пассивными излучателями. На рис. 1 возбуждаемый излучатель с номером 13 отмечен жирной точкой. Пассивные излучатели нагружены на согласованные нагрузки.

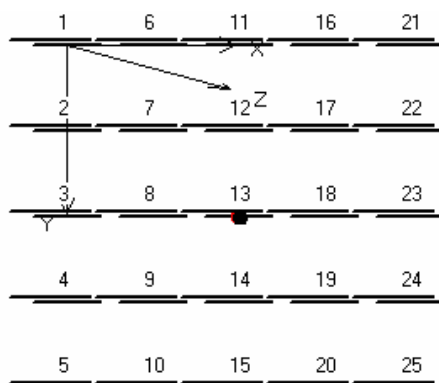


Рис. 1. Фрагмент решетки для учета взаимодействия

На рис. 2,а показана ДН в передней полусфере в плоскостях  $E$  и  $H$  с учетом взаимодействия, на рис. 2,б – без учета взаимодействия. Как видно, взаимодействие излучателей приводит к расширению главного лепестка ДН излучателя. Вследствие этого увеличиваются боковые лепестки ДН решетки, уменьшается КНД. Геометрические размеры используемого излучателя

оптимизированы по минимуму обратного излучения и обеспечивают на центральной частоте входное сопротивление 75 Ом. Математическая модель излучателя не учитывает наличие элементов крепления.

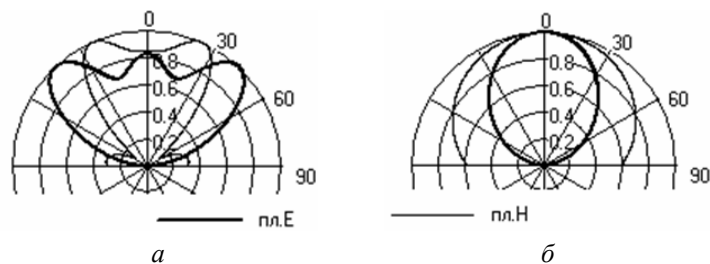


Рис. 2. ДН излучателя решетки: *а* – с учетом взаимодействия, *б* – без учета взаимодействия

Мощность излучения каждого приемо-передающего модуля решетки пропорциональна квадрату амплитуды электрического поля, возбуждающего излучатель. Поэтому энергетический показатель  $K_e = P_s / P_{1\max}$  определяется выражением:

$$K_e = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn}^2. \quad (4)$$

КНД решетки (далее обозначается символом  $D$ ) определяется с помощью известного выражения [2, 3]:

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} F^2(\theta, \varphi) \sin \theta \cdot d\varphi \cdot d\theta}, \quad (5)$$

где  $F(\theta, \varphi)$  – нормированная ДН решетки.

Как уже отмечалось, рассмотрены три формы раскрыва – прямоугольная, эллиптическая и восьмиугольная. Прямоугольный и эллиптический раскрывы задаются числом излучателей  $M$  и  $N$  (для эллиптического раскрыва вдоль главных диаметров). Восьмиугольная форма задается числом излучателей  $M$  и  $N$  и числом излучателей в усеченной части в углах прямоугольника вдоль кромки решетки –  $N_b$ .

### Результаты численного моделирования

Ниже на графиках представлены зависимости энергетического показателя  $K_e$  от числа излучателей для решеток с тремя указанными формами раскрыва при  $N=M$  и одинаковым амплитудным распределением в строках и в столбцах ( $\Delta_m = \Delta_n = \Delta$ ,  $P_n = P_m = P$ ). Для эллиптического и восьмиугольного раскрывов  $M$  – число излучателей в строке с максимальным числом излучателей.

Сравнение решеток проводилось при условии равенства ширины главного лепестка и уровня максимального бокового лепестка в решетках с разными формами раскрыва. В решетке с эллиптической формой раскрыва задавались параметры амплитудного распределения  $\Delta$  и  $P$ . Для обеспечения таких же параметров ДН в решетке с прямоугольной формой раскрыва подбирались новые значения  $\Delta$  и  $P$  и число излучателей в строке и в столбце. В решетке с восьмиугольной формой раскрыва использовались те же значения  $\Delta$  и  $P$ , что и в решетке с эллиптическим раскрывом, но подбирались значения числа излучателей  $N$  и  $N_b$ . При выполнении условия равенства параметров ДН определялся показатель  $K_e$  и КНД. При указанных условиях КНД почти одинаков в решетках с разными формами раскрыва.

Для иллюстрации закономерностей на рис.3 показаны зависимости от числа излучателей  $M$  энергетического показателя ( $K_e$ ) и коэффициента направленного действия ( $D$ ) для случая, когда в решетках с эллиптическим и восьмиугольным раскрывом амплитудное распределение равномерное ( $A_{mn} = 1$  или  $\Delta = 1$ ). В решетке с прямоугольным раскрывом амплитудное

распределение комбинированное, спадающее к краям с параметром  $P=1$ . Параметр  $\Delta$  в зависимости от числа излучателей в строке  $M$  меняется от 0,7 до 0,58. Это обеспечивало равенство уровня максимального бокового лепестка  $F_{bm}$  в решетках с разной формой раскрыва (уровень  $F_{bm}$  отличался на доли децибела в решетках с разной формой раскрыва). Обозначение кривых на рисунках: 1 – эллиптический раскрыв, 2 – прямоугольный раскрыв, 3 – восьмиугольный раскрыв.

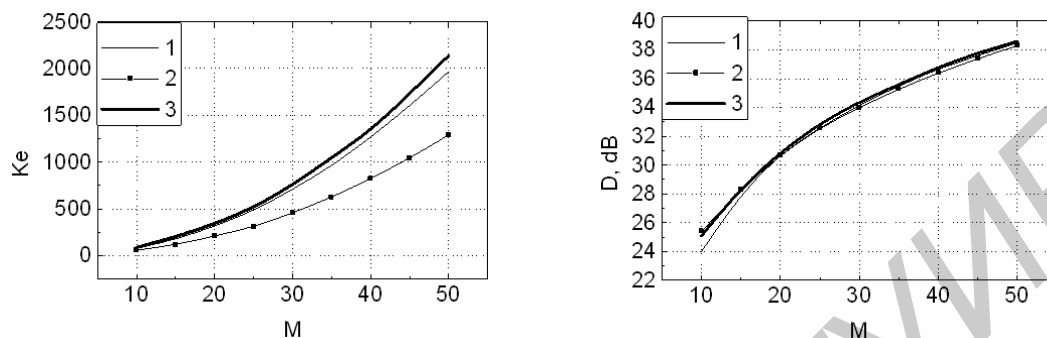


Рис. 3. Зависимость параметров решетки от числа излучателей в строке и формы раскрыва

Из рис. 3 следует, что КНД всех решеток примерно одинаков, но решетка с прямоугольным раскрывом проигрывает по энергетическому показателю. Решетка с прямоугольным раскрывом проигрывает также и по числу излучателей, что иллюстрируется рис. 4,а, на котором показана зависимость числа излучателей в решетке  $N_r$  от числа  $M$  излучателей в строке. Обозначение кривых на рисунке такое же, как на рис. 3. Решетка с восьмиугольным раскрывом по рассмотренным критериям имеет преимущества перед решетками с прямоугольной и эллиптической формами раскрыва.

Аналогичные закономерности имеют место в решетках с рассмотренными формами раскрыва и при других параметрах амплитудного распределения. На рис.4б показаны зависимости энергетического показателя  $K_e$  для решеток с разной формой раскрыва в зависимости от уровня максимального бокового лепестка  $F_{bm}$ . В качестве примера зависимости показаны для решеток с  $M=50$ . Обозначение кривых на рисунке такое же, как на рис.3.

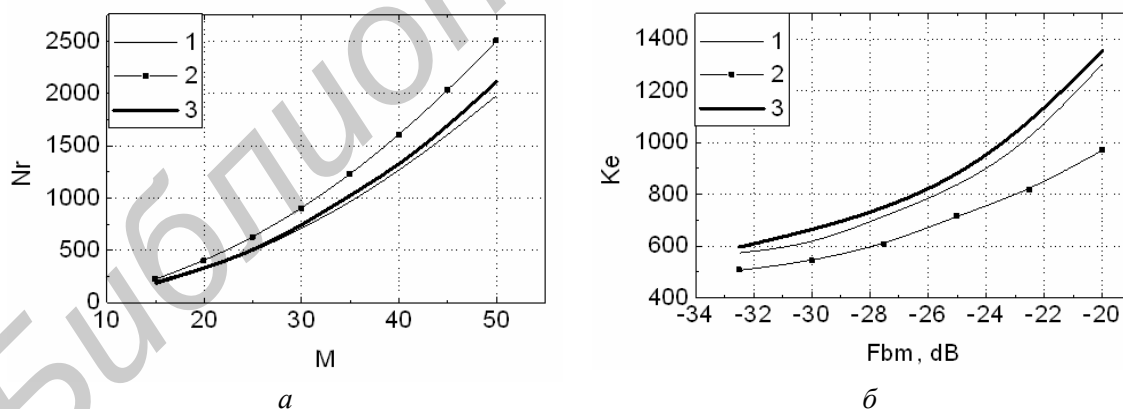


Рис. 4. Зависимость числа излучателей в решетке от  $M$  (а); зависимость коэффициента  $K_e$  от уровня боковых лепестков (б)

Решетка с восьмиугольным раскрывом имеет небольшое преимущество и по значению КНД. В то же время решетка с восьмиугольным раскрывом по сравнению с решеткой с эллиптическим раскрывом имеет и недостаток. Усечение прямоугольного раскрыва до восьмиугольного имеет смысл только в том случае, когда выполняется условие

$$N_b \leq \frac{\sqrt{2}}{4} M \text{ или } N_b \leq \frac{\sqrt{2}}{4} N, \quad (6)$$

где  $N_b$  – число излучателей на усеченной части на кромке раскрыва вдоль оси  $X(Y)$ . На рис. 5 для пояснения этого показаны три восьмиугольных раскрыва при  $N=M=32$ . Это связано с тем, что с увеличением  $N_b$  уменьшается уровень боковых лепестков в главных плоскостях  $XZ$  ( $\varphi=0$ ) и  $YZ$  ( $\varphi=90^\circ$ ) и возрастает в диагональной плоскости ( $\varphi=45^\circ$ ). При условии  $N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M$  уровень боковых лепестков в главных и диагональных плоскостях становится одинаковым. При этом все стороны восьмиугольника становятся одинаковыми. При  $N_b > \frac{\sqrt{2}}{4}M$  уровень боковых лепестков в диагональных плоскостях становится больше, чем в главных плоскостях. Рис. 6 иллюстрирует сказанное. На нем показаны формы решеток и соответствующие им ДН. На графиках ДН в диагональной плоскости ( $\varphi=45^\circ$ ) показаны серым цветом, в плоскости  $XZ$  – черным цветом. Как видно, при  $N_b=0,5M$  (рис. 7,б) плоскость  $XZ$  становится диагональной, и боковые лепестки в этой плоскости становятся минимальными.

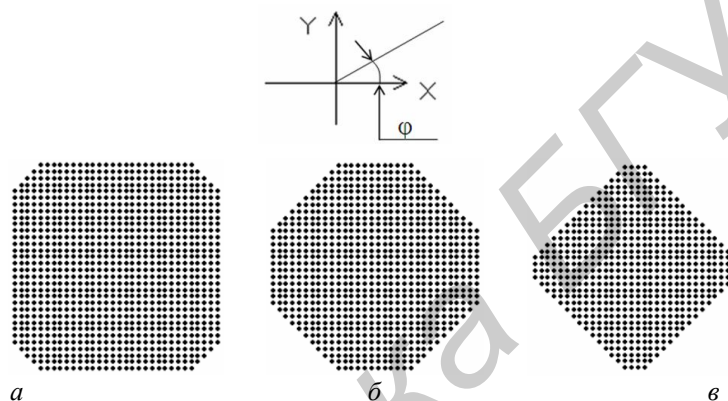


Рис. 5. Восьмиугольные решетки с разным числом излучателей на усеченной части:

$$a - N_b < \frac{\sqrt{2}}{4}M; \quad б - N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M; \quad в - N_b > \frac{\sqrt{2}}{4}M$$

При усечении углов решетки на величину  $N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M$  раскрыв становится восьмиугольным с равными сторонами. В этом случае в плоскостях  $\varphi=0$  и  $\varphi=45^\circ$  боковые лепестки в множителе системы решетки одинаковые. В диаграмме направленности различие будет за счет отсутствия осевой симметрии ДН одного излучателя (рис. 2). На рис. 7 показан этот случай: на рис. 7,а показан раскрыв решетки, на рис. 7,б – ДН решетки.

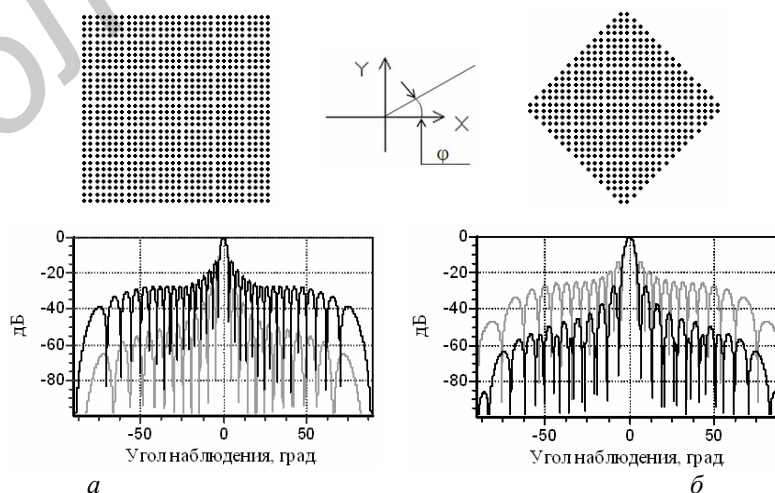


Рис. 6. ДН решетки с  $N=M=32$  и равномерным амплитудным распределением:

$$a - N_b=0; \quad б - N_b=16$$

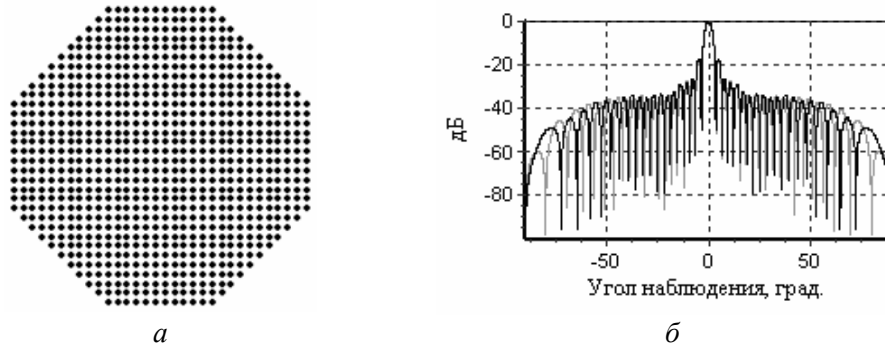


Рис. 7. Антенная решетка с  $N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M$  и равномерным амплитудным распределением:  
 а – раскрыв решетки; б – ДН решетки

Усечение углов решетки на величину  $N_b = \frac{\sqrt{2}}{4}M$  приводит к уменьшению уровня боковых лепестков в главных плоскостях. Например, при равномерном исходном амплитудном распределении возбуждения излучателей и  $N=M$  (раскрыв квадратный) уровень боковых лепестков уменьшается с  $-13,2$  дБ до  $-18,9$  дБ. В решетке с круглой формой раскрыва уровень боковых лепестков составляет  $-17,3$  дБ. В этом случае восьмиугольная решетка имеет преимущества перед решеткой с круглой апертурой. Если раскрыв прямоугольный ( $N \neq M$ ) преимущество решетки с восьмиугольной формой раскрыва теряется по сравнению с решеткой с эллиптической формой раскрыва. Так, при  $N=0,5M$  в решетке с  $N_b=0,5N$  (решетка шестиугольная – рис. 8) боковые лепестки снижаются только до значения  $-16,5$  дБ при равномерном АР. При таком же АР в решетке с  $N=0,5M$  и эллиптической формой раскрыва (рис.8) уровень боковых лепестков составляет по-прежнему  $-17,2$  дБ. При соотношении  $M/N=0,25$  и  $N_b=0,5N$  в решетке с шестиугольным раскрывом при равномерном АР уровень  $F_{bm}$  снижается всего на  $0,6$  дБ по сравнению с прямоугольным раскрывом, а в решетке с эллиптическим раскрывом – на  $3,5$  дБ. Примерно такие же закономерности наблюдаются и при других амплитудных распределениях.

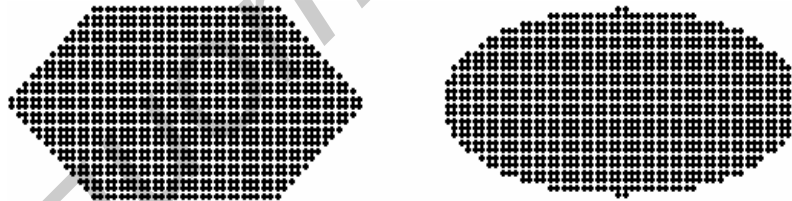


Рис. 8. Решетки с шестиугольной и эллиптической формами раскрыва

### Заключение

Рассмотрен энергетический показатель эффективности активной антенной решетки при ограничении на максимальную мощность излучения одного приемо-передающего модуля – коэффициент  $K_e$ , равный отношению полной мощности излучения решетки к максимальной мощности излучения одного приемо-передающего модуля. Коэффициент  $K_e$  характеризует степень использования потенциальной мощности активной решетки. Исследовано влияние на  $K_e$  формы раскрыва, амплитудного распределения возбуждения излучателей решетки, числа излучателей. Показано, что по этому показателю решетка с прямоугольной формой раскрыва уступает решеткам с эллиптической и восьмиугольной формами раскрыва. При равенстве числа излучателей вдоль главных сторон (или диаметров) раскрыва решетка с восьмиугольным раскрывом имеет преимущества перед решеткой с круглым раскрывом. Однако это преимущество исчезает при увеличении отношения числа излучателей вдоль главных сторон (или диаметров) раскрыва, т.е. с увеличением отношения ширины главного лепестка в главных плоскостях.



# COMPARATIVE ANALYSIS OF FLAT PHASED ARRAY ANTENNAS WITH VARIOUS APERTURE FORMS ON ENERGY CRITERION

O.A. YURTSEV, A.P. YUBKO, D.V. MOSKALIOV, N.M. NAUMOVICH

## Abstract

Active antenna array antennas with rectangle, elliptical and octagonal aperture forms are compared on radiation power criterion, if maximum power of each element is limited. Comparison conditions: maximum radiation power of each transmitter-receiver module (TRM) and main radiation pattern parameters are equal for all investigated array antennas.

## Список литературы

1. *Гостюхин В.Л., Трусов В.Н., Гостюхин А.В.* // Антенны. 2009. №3. С. 10.
2. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М., 1988.
3. *Ямайкин В.Е.* Антенные устройства. Мн., 1965.
4. *Митра Р.* Вычислительные методы в электродинамике. М., 1977.

Библиотека БГУИР

УДК 615.847; 612.741.1

## МЕТОД И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМИОСТИМУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ СУММАРНОЙ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИИ НЕРВНО-МЫШЕЧНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА

М.М. МЕЖЕННАЯ, А.Н. ОСИПОВ, М.В. ДАВЫДОВ, Н.С. ДАВЫДОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 16 января 2012*

Разработаны метод и техническое обеспечение адаптивной электромиостимуляции на основе анализа амплитудно-частотных параметров суммарной электромиограммы стимулируемой мышцы. Аппарат электромиостимуляции осуществляет воздействие стимулирующими сигналами различной сократительной способности с учетом индивидуального функционального состояния нервно-мышечного аппарата человека и выполняет контроль эффективности терапевтических процедур. Предложенный метод позволяет повысить информативность диагностики нервно-мышечного аппарата человека посредством автоматического частотно-временного анализа суммарных электромиограмм, а также повысить эффективность профилактики и лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата человека за счет согласования параметров сигнала электромиостимуляции с физиологическими характеристиками стимулируемой мышцы. Полученные результаты представляют интерес для инженеров, специализирующихся в области разработки систем электромиографии и электромиостимуляции.

*Ключевые слова:* адаптивная электромиостимуляция, электромиостимулятор, суммарная электромиография, электромиограмма, нервно-мышечная система, опорно-двигательный аппарат, частотно-временной анализ, спектрограмма.

### Введение

Физиологический эффект электромиостимуляционной терапии зависит от начального функционального состояния нервно-мышечного аппарата и выбора параметров воздействующего сигнала. На сегодняшний день остаются актуальными задачи поиска научно-обоснованных принципов определения параметров воздействия и синтез сигналов электромиостимуляции с заданными терапевтическими свойствами на основе разработанных критериев.

Создание новой медицинской техники и аппаратных методов лечения должно опираться на возможности современных технологий и глубокое понимание явлений, происходящих при взаимодействии технических средств и живого организма [1–3]. Перспективным подходом при этом является применение биотехнической обратной связи. По контуру биотехнической обратной связи передаются электрические параметры, характеризующие биологическое состояние объекта. На основе данной информации в соответствии с целевой функцией производится автоматическое управление параметрами сигнала воздействия. Таким образом, осуществляется согласование параметров биообъекта и технических компонентов системы, выработка оптимального лечебного воздействия [4].

В соответствии с вышеизложенным эффективная электромиостимуляция должна быть основана на согласовании параметров стимула с физиологическими характеристиками стимулируемых мышц. Объективным диагностическим показателем функционального состояния мышечных групп служат параметры электромиографического (ЭМГ) сигнала [5–6]. В связи с этим целесообразно разрабатывать лечебно-диагностические комплексы, предусматривающие

оценку функционального состояния нервно-мышечного аппарата методом электромиографии, синтез сигналов электромиостимуляции, адекватных индивидуальному состоянию мышечных групп, контроль эффективности терапевтического воздействия.

Основной задачей, от решения которой зависит эффективность электромиостимуляционной терапии, является выработка критериев формирования стимулирующего воздействия. Проведенные авторами исследования выявили целесообразность использования в качестве критерия синтеза стимулирующего сигнала амплитудные и частотные параметры суммарной электромиограммы стимулируемой мышцы, полученные в результате частотно-временной обработки ЭМГ-сигнала и отражающие функциональное состояние мышечной ткани [7–8].

В данной работе разработаны метод адаптивного управления миостимулирующими свойствами сигнала воздействия на основе анализа амплитудно-частотных характеристик суммарной электромиограммы стимулируемой мышцы и техническое обеспечение аппарата электромиостимуляции, функционирующего в соответствии с данным методом.

### **Метод адаптивной электромиостимуляции на основе анализа амплитудно-частотных параметров суммарной электромиограммы стимулируемой мышцы**

При разработке метода адаптивного управления параметрами стимулирующего сигнала, основополагающими выступили следующие положения: взаимосвязь амплитудно-частотного коэффициента суммарной электромиограммы и функционального состояния стимулируемой мышцы, установленная авторами [8]; взаимосвязь функционального состояния мышцы и миостимулирующих свойств воздействующего сигнала, требуемых для проведения эффективной электротерапии [9]. Сущность метода заключается в выборе стимула с миостимулирующими свойствами, адекватными по своему физиологическому действию индивидуальному функциональному состоянию нервно-мышечного аппарата человека.

Разработанный метод адаптивного управления миостимулирующими свойствами сигнала воздействия включает следующие этапы: 1) диагностика функционального состояния нервно-мышечного аппарата человека; 2) контроль эффективности электромиостимуляционной терапии; 3) синтез сигнала электромиостимуляции с требуемыми миостимулирующими свойствами; 4) проведение сеанса электромиостимуляционной терапии (рис. 1).

На этапе диагностики функционального состояния нервно-мышечного аппарата человека выполняется регистрация суммарной электромиограммы стимулируемой мышцы, построение спектрограммы методом частотно-временного преобразования и расчет амплитудно-частотного коэффициента ЭМГ-сигнала. При этом частотно-временная обработка электромиограммы и определение амплитудно-частотных параметров производится в соответствии с разработанной авторами методикой [7–8].

Качественный (визуальный) анализ суммарной электромиограммы производится посредством построения спектрограммы. Вывод спектрограммы в режиме реального времени позволяет врачу контролировать процесс проведения процедуры электромиографии, дает возможность усилить диагностическую значимость количественных данных (например, выполнить визуальную оценку способности мышцы к тоническому напряжению) и использовать полученную информацию на этапе конкретизации параметров стимуляции (например, при установке амплитуды стимула).

Количественный анализ суммарной электромиограммы основан на расчете амплитудно-частотного коэффициента  $AFK$ , равного отношению средней амплитуды ЭМГ-сигнала  $A_{avr}$  к средней эффективной ширине спектра  $\Delta f_{avr}$  и вычисляемого по результатам частотно-временной обработки:

$$AFK = A_{avr} / \Delta f_{avr}.$$

Целесообразность использования такого показателя выявлена в результате проведенных авторами исследований амплитудных и частотных параметров электромиограмм в норме и при патологии [8]. Установлено, что в норме ЭМГ-сигнал характеризуется высокими значениями амплитуды и более узкой эффективной шириной спектра по сравнению с патологией. Тогда отношение амплитуды к эффективной ширине спектра есть показатель, учитывающий

основные параметры биоэлектрического сигнала (амплитуду и частоту), причем значение этого показателя в норме существенно больше, нежели при патологии.

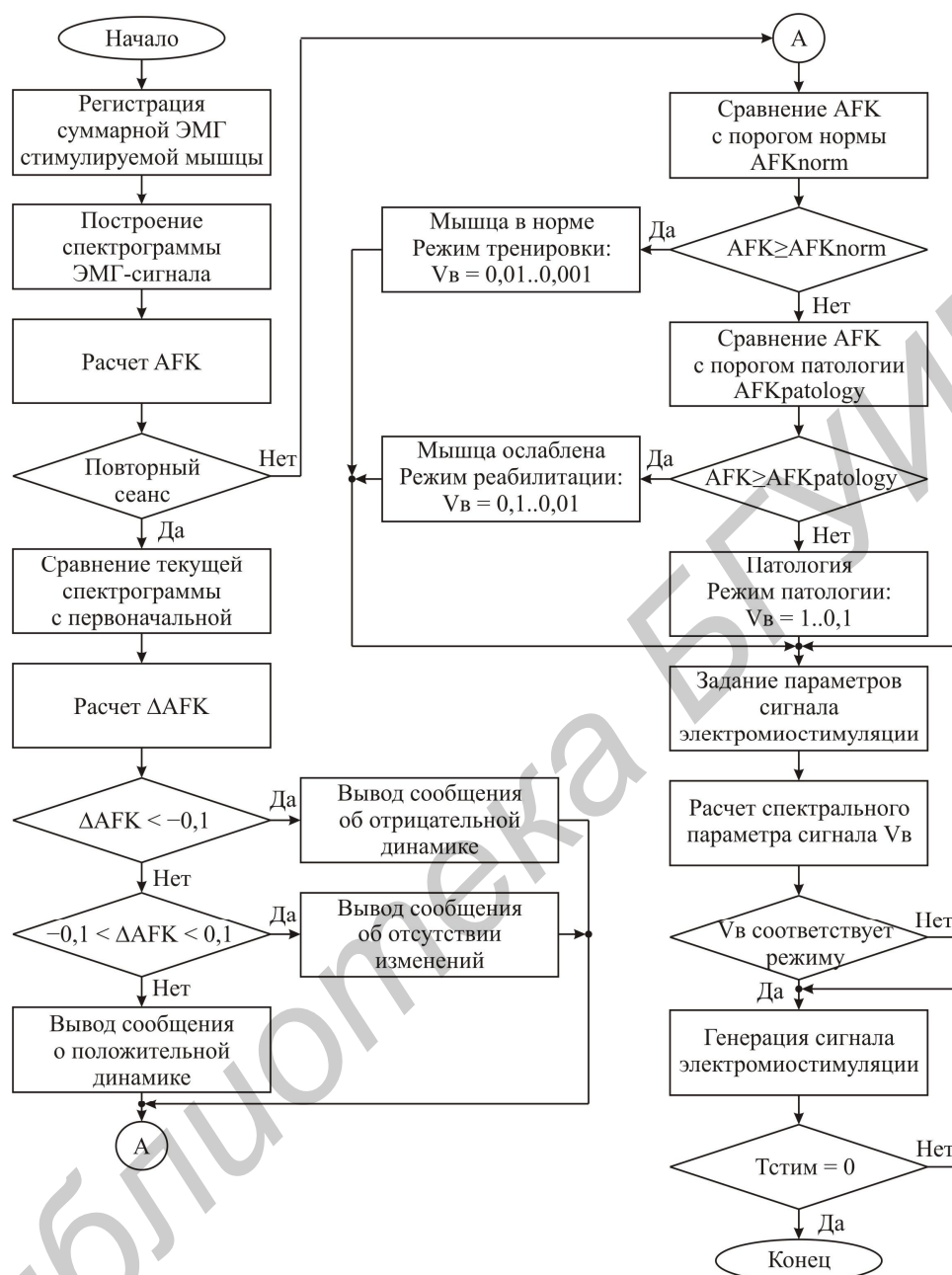


Рис. 1. Метод адаптивной электромиостимуляции на основе анализа амплитудно-частотных параметров суммарной электромиограммы стимулируемой мышцы

Этап контроля эффективности электромиостимуляционной терапии выполняется при проведении следующих после первого сеансов электротерапии и предусматривает наличие диагностической информации, полученной на первом этапе. Контроль эффективности электромиостимуляционной терапии базируется на анализе динамики изменения состояния нервно-мышечного аппарата. Для этого выполняется визуальное сравнение текущей и исходной спектрограмм врачом с целью усиления диагностической значимости количественных данных, а также рассчитывается относительное изменение амплитудно-частотного коэффициента под действием электромиостимуляционной терапии:

$$\Delta AFK = (AFK_i - AFK_0) / AFK_0,$$

где  $AFK_i$  – амплитудно-частотный коэффициент ЭМГ-сигнала, зарегистрированного перед текущим сеансом электромиостимуляции,  $AFK_0$  – амплитудно-частотный коэффициент исходной электромиограммы, зарегистрированной до начала курса электромиостимуляционной терапии.

Расчет величины изменения амплитудно-частотного коэффициента относительно первоначального значения позволяет учесть исходное функциональное состояние стимулируемой мышцы, а как результат – обеспечить сопоставимость данных как для пациентов с нарушением двигательных функций, так и для здоровых людей, решающих задачу тренировки нервно-мышечного аппарата.

При получении величины относительного изменения амплитудно-частотного коэффициента менее  $-0,1$  выводится сообщение об ухудшении параметров стимулируемой мышцы. При получении величины относительного изменения амплитудно-частотного коэффициента свыше  $0,1$  выводится сообщение об улучшении параметров стимулируемой мышцы. Если рассчитанный показатель находится в пределах  $-0,1..0,1$ , то выводится сообщение об отсутствии изменений.

Анализ динамики изменения функционального состояния нервно-мышечного аппарата используется для объективной оценки эффективности применения терапевтических мероприятий и прогнозирования сроков восстановления нарушенных двигательных функций.

Этап анализа функционального состояния мышцы и синтеза сигнала электромиостимуляции производится в соответствии с рассчитанным на первом этапе амплитудно-частотным коэффициентом.

В качестве уровней градации индивидуального функционального состояния мышцы предлагается использовать следующие: состояние нормы, состояние ослабленных тканей, состояние патологии. Следует отметить, что диапазоны амплитудно-частотных показателей ЭМГ-сигнала при различных состояниях специфичны для каждой мышцы в силу ее морфологических и функциональных особенностей. В связи с этим предлагается:

- ставить в соответствие состоянию нормы усредненные показатели суммарной электромиограммы, зарегистрированной у здоровых лиц и отражающей суммарную активность большого числа двигательных единиц;

- ставить в соответствие состоянию ослабленных тканей усредненные показатели суммарной электромиограммы, зарегистрированной у пациентов с нарушениями двигательных функций и характеризующейся значительно сниженной по сравнению с нормой биоэлектрической активностью;

- ставить в соответствие состоянию патологии усредненные показатели суммарной электромиограммы, зарегистрированной у пациентов с высокой степенью патологических изменений в мышцах и состоящей из отдельных потенциалов действия двигательных единиц или представляющей собой полное биоэлектрическое молчание. [8].

В зависимости от величины амплитудно-частотного коэффициента ЭМГ-сигнала предусмотрены следующие режимы электромиостимуляции.

1. Величина амплитудно-частотного коэффициента, равная или превышающая порог нормы  $AFK_{norm}$ , свидетельствует о хорошем функциональном состоянии стимулируемой мышцы. В этом случае электромиостимуляция применяется для увеличения мышечной силы и процедура проводится в режиме тренировки, т.е. сигналами с высокой сократительной способностью (с максимальными миостимулирующими свойствами) [9].

2. Если величина амплитудно-частотного коэффициента меньше порога нормы  $AFK_{norm}$ , но равна или превышает порог существенных патологических изменений  $AFK_{patology}$ , то электромиостимуляция тканей проводится в режиме реабилитации. При этом используются сигналы со средней сократительной способностью [9].

3. Величина амплитудно-частотного коэффициента, не превышающая порог существенных патологических изменений  $AFK_{patology}$ , свидетельствует о высокой степени поражения мышцы. В таких случаях необходимо применять сигналы электромиостимуляции с низкой сократительной способностью [9].

Выбор параметров стимула, обеспечивающих требуемую сократительную способность сигнала воздействия, осуществляется на основании выявленной в работе [10] взаимосвязи ме-

жду спектральными характеристиками сигналов электростимуляции и их физиологической эффективностью при воздействии на мышечную ткань (рис. 2). Оценка сигналов осуществлялась по двум параметрам: эффективной ширине спектра сигнала  $F$  и взвешенному коэффициенту вариации  $Vb$ . Установлено, что наиболее эффективные из известных сигналов электростимуляции характеризуются равномерным распределением энергии в эффективной полосе спектра (значение коэффициента вариации  $Vb$  менее 0,1) и шириной эффективной полосы спектра  $F=1 - 10$  кГц.

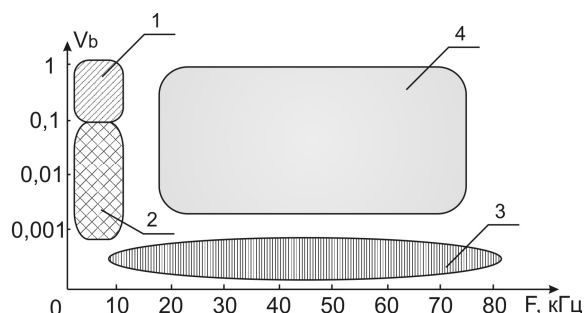


Рис. 2. Спектральные параметры сигналов электростимуляции:

- 1 – сигналы электростимуляции со слабым сократительным эффектом,
- 2 – сигналы электростимуляции с сильным сократительным эффектом,
- 3 – сигналы электроанальгезии, 4 – неэффективные сигналы электростимуляции [10]

Для сигналов электростимуляции с максимальными миостимулирующими свойствами взвешенный коэффициент вариации задается в пределах  $Vb=0,01..0,001$ . При использовании сигналов со средней сократительной способностью взвешенный коэффициент вариации устанавливается в пределах  $Vb=0,1..0,01$ . Для сигналов электростимуляции с низкой сократительной способностью взвешенный коэффициент вариации задается в пределах  $Vb=1..0,1$ .

Далее выполняется конкретизация параметров стимулирующего сигнала (выбор формы огибающей стимулирующего сигнала, задание несущей частоты, максимальной амплитуды и др.) и выполняется его синтез. Затем производится проверка соответствия сигнала выбранному режиму (тренировки, реабилитации или патологии) путем автоматического расчета взвешенного коэффициента вариации  $Vb$  стимулирующего сигнала. Если полученное значение коэффициента вариации не удовлетворяет заданному, производится корректировка параметров стимула.

Этап проведения сеанса электростимуляционной терапии осуществляется путем воздействия синтезированным сигналом электростимуляции на требуемую мышцу в течение заданного промежутка времени.

### Устройство адаптивной электростимуляции на основе суммарной электромиографии

Исходя из разработанного метода, предложена структурная схема аппарата электростимуляции с биотехнической обратной связью на основе анализа амплитудно-частотных параметров суммарной электромиограммы стимулируемой мышцы (рис. 3).

На этапе диагностики выполняется регистрация суммарной электромиограммы объекта стимуляции с помощью поверхностных электромиографических электродов, усиление и фильтрация ЭМГ-сигнала, его преобразование из аналоговой в цифровую форму. Далее производится частотно-временная обработка суммарной электромиограммы (блок быстрого оконного преобразования Фурье), результатом которой является спектрограмма, и рассчитываются амплитудно-частотные параметры ЭМГ-сигнала. Суммарная электромиограмма и соответствующая спектрограмма выводятся на устройство отображения информации в реальном режиме времени. Амплитудно-частотные параметры электромиографического сигнала рассчитываются на заданном пользователем интервале зарегистрированной электромиограммы и также выводятся на устройство отображения информации.

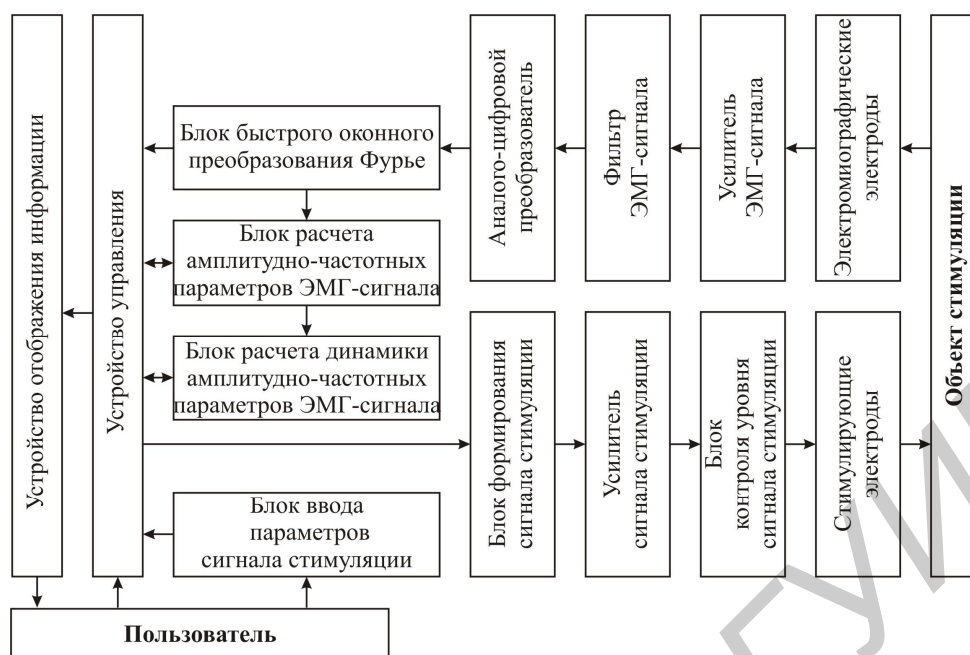


Рис. 3. Структурная схема аппарата электромиостимуляции с биотехнической обратной связью на основе анализа амплитудно-частотных параметров суммарной электромиограммы стимулируемой мышцы

Полученные количественные параметры суммарной электромиограммы поступают в блок расчета динамики амплитудно-частотных параметров ЭМГ-сигнала и используются при проведении повторных сеансов на этапе контроля эффективности электромиостимуляционной терапии. Для этого в вышеуказанном блоке рассчитывается относительное изменение амплитудно-частотного коэффициента, а в зависимости от полученных результатов на устройство отображения информации выводится соответствующее зафиксированной динамике сообщение.

На этапе синтеза сигнала электромиостимуляции в устройстве управления осуществляется сравнительный анализ полученного значения амплитудно-частотного коэффициента ЭМГ-сигнала и пороговых величин нормы и патологии, характерных для исследуемой мышцы. По итогам сравнения на устройство отображения информации выводится сообщение о требуемом режиме электромиостимуляции (режим тренировки, реабилитации или патологии). Далее пользователю предлагается конкретизировать параметры стимула с помощью блока ввода параметров сигнала стимуляции. Устройство управления осуществляет расчет коэффициента вариации сигнала электромиостимуляции с заданными параметрами и в случае его соответствия выбранному режиму производится запуск блока формирования сигнала стимуляции. Сформированный сигнал воздействия поступает на усилитель сигнала стимуляции, а затем – в блок контроля уровня сигнала стимуляции для обеспечения защиты пациента от превышения максимально допустимого уровня стимула. Подача сигнала на объект стимуляции осуществляется посредством стимулирующих электродов на протяжении заданного пользователем времени процедуры электромиостимуляции.

### Заключение

Разработаны метод и техническое обеспечение адаптивной электромиостимуляции на основе анализа амплитудно-частотных параметров суммарной электромиограммы стимулируемой мышцы. Аппарат электромиостимуляции осуществляет воздействие стимулирующими сигналами различной сократительной способности с учетом индивидуального функционального состояния нервно-мышечного аппарата человека и выполняет контроль эффективности терапевтических процедур. Для здоровых мышц, амплитудно-частотный коэффициент ЭМГ-сигнала которых равен или превышает порог нормы ( $AFK \geq AFK_{norm}$ ), с целью тренировки и увеличения мышечной силы синтезируются сигналы с высокой сократительной способностью (взвешенный коэффициент вариации задается в пределах  $Vb=0,01..0,001$ ). Для мышц с высокой степенью патологических изменений, характеризующихся амплитудно-частотным коэффици-

ентом менее порога патологии ( $AFK < AFK_{patology}$ ), с целью лечения синтезируются сигналы с низкой сократительной способностью (взвешенный коэффициент вариации задается в пределах  $Vb=1..0,1$ ). Для ослабленных мышц, амплитудно-частотный коэффициент ЭМГ-сигнала которых удовлетворяет условию  $AFK_{patology} \leq AFK < AFK_{norm}$ , с целью реабилитации синтезируются сигналы со средней сократительной способностью (взвешенный коэффициент вариации задается в пределах  $Vb=0,1..0,01$ ). Предложенный метод позволяет повысить информативность диагностики нервно-мышечного аппарата человека посредством автоматического частотно-временного анализа суммарных электромиограмм, а также повысить эффективность профилактики и лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата человека за счет согласования параметров сигнала электромиостимуляции с физиологическими характеристиками стимулируемой мышцы. Полученные результаты представляют интерес для инженеров, специализирующихся в области разработки систем электромиографии и электромиостимуляции.

## METHOD AND TECHNICAL MAINTENANCE OF ADAPTIVE ELECTRICAL STIMULATION ON THE BASE OF GLOBAL ELECTROMYOGRAPHY OF HUMAN NEUROMUSCULAR SYSTEM

M.M. MEZHENNAYA, A.N. OSIPOV, M.V. DAVYDOV, N.S. DAVYDOVA

### Abstract

The adaptive electrical stimulation method and technical maintenance have been designed on the base of the amplitude and frequency parameter analyses of global electromyogram of stimulated muscle. The electrical stimulator carries out influence by the stimulating signals various reduction abilities taking into account the individual human neuromuscular system functional condition and control of the efficiency of therapeutic procedures. The results of this work can be interesting for developer of the electromyography and electrical stimulation systems.

### Список литературы

1. *Судаков К.В.* Основы физиологии функциональных систем. М., 1985.
2. *Ахутин В.М.* Биотехнические системы: Теория и проектирование. Л., 1981.
3. *Беркутов А.М., Жулев В.И., Кураев Г.А. и др.* Системы комплексной электромагнитотерапии. М., 2000.
4. *Осипов А.Н., Дик С.К., Сеньковский К.Г.* // Медицинская техника. 2002. №6. С. 27–29.
5. *Николаев С.Г.* Практикум по клинической электромиографии. Иваново, 2001.
6. *Гехт Б.М.* Теоретическая и клиническая электромиография. Л., 1990.
7. *Меженная М.М., Давыдова Н.С., Осипов А.Н.* // Современные средства связи. 2010. С. 136–137.
8. *Меженная М.М., Осипов А.Н., Ильясевич И.А. и др.* // Научные труды НИИ физической культуры и спорта Республики Беларусь. 2011. Вып. 10. С. 362–367.
9. *Улащик В.С., Лукомский И.В.* Общая физиотерапия. М., 2004.
10. *Давыдов М.В.* Методы и технические средства электромиостимуляции на основе импедансных характеристик биотканей. дис. к-та тех. наук 05.11.17. Мн., 2009.



УДК 004.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ В ОБЪЕКТАХ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ИХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ

Л.Л. УТИН, Х.М. КРЕД, М.А. САБЕРИАН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 28 февраля 2012*

На основании проведенных исследований возможностей разработанного программного продукта, предназначенного для построения зон радиоизлучений электронных вычислительных машин (далее – ЭВМ) [1], предложен подход к оптимизации размещения ЭВМ в объектах информатизации по критерию минимизации уровня радиоизлучений за пределы контролируемой зоны (далее – КЗ).

*Ключевые слова:* затухание сигналов, зона излучений, моделирование, радиоизлучения, контролируемая зона, оптимизация размещения.

### Введение

В ранее опубликованной статье [1] было показано, что используемый в настоящее время подход к определению целесообразности применения в объектах информатизации «защищаемое помещение» (далее – объект информатизации) активных и пассивных средств защиты информации от ее утечки по каналам побочных электромагнитных излучений и наводок (далее – ПЭМИН) обладает рядом достоинств и недостатков. Одним из основных выявленных недостатков является недостаточное внимание исследованиям условий функционирования ЭВМ внутри объекта информатизации, в результате чего требования, предъявляемые к защите информации, являются завышенными. С целью повышения обоснованности использования активных и пассивных средств защиты предложена методика построения зоны радиоизлучений ЭВМ в объекте информатизации, позволяющая учесть затухания ПЭМИН при их распространении через стены, мебель, сейфы и другие предметы интерьера. В развитии данного направления проведены дополнительные исследования влияния местоположения ЭВМ в объекте информатизации на площадь зоны ее радиоизлучений и предложена методика оптимизации размещения ЭВМ, рассмотренная ниже.

### Теоретический анализ

Специалистам в области защиты информации известно, что перехват информации, обрабатываемой на ЭВМ, без проникновения в область КЗ применяется злоумышленниками в тех случаях, когда использование ими других способов хищения требуемых сведений не позволяет достигнуть поставленных целей. Возможность такого способа негласного добывания информации описана в многочисленных научных трудах [2–7] и осуществляется путем применения разведывательной аппаратуры, в состав которой могут входить анализатор спектра, сканирующий приемник, комплект направленных антенн, ЭВМ с установленным специальным программным обеспечением и другое оборудование.

В ходе проведенного анализа особенностей измерений утечки информации через канал ПЭМИН, были выявлены факторы, влияющие на вероятность перехвата данных, обрабатываемых на ЭВМ [6], основными из которых являются:

- удаление аппаратуры перехвата от места радиоизлучений ЭВМ;
- высота помещения, в котором функционирует ЭВМ;
- высота расположения антенн разведывательной аппаратуры;
- количество электронного оборудования, функционирующего в помещении;
- вероятность обработки на ЭВМ конфиденциальной информации к моменту перехвата;
- значения уровней сигналов на частотах радиоизлучений информативных ПЭМИН ЭВМ;
- принятые меры по защите объекта информатизации от разглашения сведений.

Для затруднения перехвата и расшифровки информативных излучений ЭВМ, функционирующих в объекте информатизации, в настоящее время комплексно применяют различные организационные и технические мероприятия защиты.

Одним из мероприятий защиты является размещение ЭВМ на максимальном удалении от границ КЗ. Основным достоинством данного мероприятия является относительно низкая стоимость приобретения средств защиты при выполнении следующего условия:

$$D_{кзmin} > D_{излmax}, \quad (1)$$

где  $D_{кзmin}$  – минимальное расстояние до внешней границы контролируемой зоны;  $D_{излmax}$  – максимальная дальность радиоизлучений ЭВМ.

При выполнении условия (1) установка средств пассивной или активной защиты информации не обязательна, так как технические возможности разведывательной аппаратуры не позволяют без проникновения на территорию КЗ осуществить перехват информации. Если условие (1) не выполняется, то есть излучение ЭВМ распространяется за территорию КЗ, то представляется целесообразным проведение исследований контуров излучений ЭВМ при ее размещении в различных точках защищаемого помещения [1]. В результате подобных исследований должно быть выявлено такое место для размещения ЭВМ в объекте информатизации, при котором радиоизлучения ЭВМ за пределы КЗ будут минимальны. Кроме того, должны быть определены наиболее опасные направления излучений, на которых рекомендуется использовать пассивные средства защиты.

### Методика

Основной целью предлагаемой методики является поиск такого места расположения ЭВМ в объекте информатизации, при котором площадь зоны радиоизлучения ЭВМ за пределы контролируемой зоны будет минимальна. Для достижения данной цели целесообразно еще на этапе планирования размещения ЭВМ решить последовательно следующие задачи:

- построить модель объекта информатизации;
- сформировать массив допустимых мест размещения ЭВМ в помещении;
- определить площади зон радиоизлучений ЭВМ при ее расположении в различных точках объекта информатизации во всем множестве информативных частот, обнаруженных в ходе проводимых лабораторных специсследований;
- определить квазиоптимальное место расположения ЭВМ в объекте информатизации.

Цель построения модели объекта информатизации заключается в моделировании элементов, характеризующих его конструктивные особенности и имеющих фиксированное местоположение и свойства (окна, двери, стены), а также размещения в помещении переменных элементов, местоположение которых может быть изменено с помощью работающего персонала (шкафы, сейфы, столы, книжные полки и т.д.). Дополнительно при выполнении данной задачи строится периметр, а также определяются зоны, запрещенные для размещения ЭВМ по некоторой причине (места размещения переменных объектов, места свободного доступа к отдельным элементам (рис. 1) и т.д.).

Входными данными для решения задачи построения модели объекта информатизации являются:

- ширина помещения;

- длина помещения;
- высота помещения над поверхностью земли (этаж здания);
- массив с данными о конструктивных элементах помещения (относительные координаты размещения верхнего левого угла элемента, его ширина, длина, коэффициенты отражения и поглощения материалов, из которых изготовлен элемент);
- массив с данными о переменных элементах, находящихся в помещении (относительные координаты размещения верхнего левого угла элемента, его ширина, длина, коэффициенты отражения и поглощения материалов, из которых изготовлен элемент);
- массив с данными о контролируемой зоне (для зоны, аппроксимируемой набором прямоугольников – относительные координаты размещения верхнего левого угла зоны, ширина, длина; для зоны, аппроксимируемой окружностью – относительные координаты центра окружности, радиус).

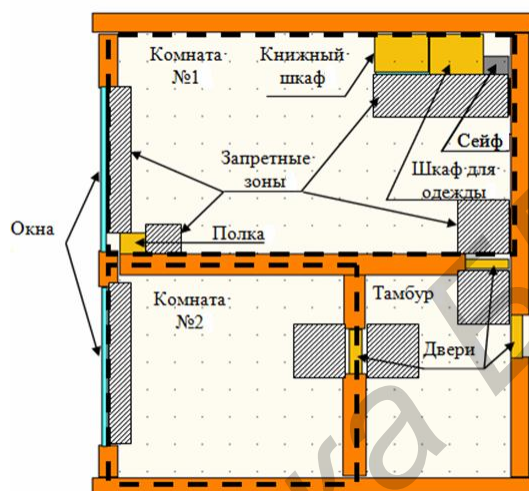


Рис. 1. Графическое представление результатов моделирования объекта информатизации

После моделирования конструктивных и переменных элементов объекта информатизации осуществляется построение зон, в которых размещение ЭВМ запрещается. Зоны предложено аппроксимировать набором прямоугольников (рис. 1), основные параметры которых (относительные координаты размещения верхнего левого угла зоны, ее ширина и длина) заносятся в соответствующий информационный массив. По известной математической формуле определяются площади зон  $S_k$ , запрещенных для размещения ЭВМ:

$$S_k = w_k l_k, \forall k \in [1, K], \quad (2)$$

где  $w_k$  – ширина  $k$ -й зоны, запрещенной для размещения ЭВМ;  $l_k$  – длина  $k$ -й зоны, запрещенной для размещения ЭВМ;  $k$  – условный номер зоны, запрещенной для размещения ЭВМ;  $K$  – максимальное количество запрещенных зон, определяемых по результатам моделирования размещения конструктивных и переменных элементов объекта информатизации.

Формирование массива допустимых мест размещения ЭВМ в помещении осуществляется путем выполнения следующих операций.

1. Площадь объекта информатизации разбивается на элементарные ячейки, площадь  $S_{эл}$  которых определяется габаритными размерами ЭВМ (или ее составной частью), используемой в объекте информатизации (таблица).

Габаритные размеры некоторых типов ЭВМ (основных составных частей ЭВМ)

Тип ЭВМ (составной части ЭВМ)	Длина, см	Ширина, см
Нетбук	25	17
Ноутбук	29	32
Системный блок	17	44
Монитор с электронно-лучевым экраном	39	40
Монитор с жидкокристаллическим экраном	43	5
Клавиатура	44	14

В результате выполнения данной операции, как правило, формируется прямоугольный массив размером  $I \times J$ , в котором значение  $I$  характеризует максимально возможное количество вариантов размещений ЭВМ по длине помещения, а значение  $J$  – максимально возможное количество вариантов размещений ЭВМ по ширине помещения. Учитывая, что одним из условий корректного решения задачи о размещении ЭВМ в объекте информатизации является не выход области полученного результата за пределы объекта информатизации, значение величины  $I$  будем определять по формуле

$$I = \frac{L_0}{l_{\text{эл}}}, \quad (3)$$

где  $L_0$  – длина объекта информатизации;  $l_{\text{эл}}$  – длина элементарной ячейки.

Аналогично для  $J$ :

$$J = \frac{W_0}{w_{\text{эл}}}, \quad (4)$$

где  $W_0$  – ширина объекта информатизации;  $w_{\text{эл}}$  – ширина элементарной ячейки.

2. Для каждой элементарной ячейки оценивается выполнение условия (5), характеризующего тот факт, что место расположения ЭВМ не перекрывает области размещения конструктивных и переменных элементов объекта информатизации, а также мест обеспечения свободного доступа к ним.

$$(S_{\text{эл}ij}) \cup (S_k) = \emptyset, \forall i \in [1, I]; j \in [1, J]; k \in [1, K]. \quad (5)$$

Выходными данными выполнения данной операции является массив  $\|Q\|$ , характеризующий область допустимых решений задачи о размещении ЭВМ в объекте информатизации. Значения  $q_{ij}$  данного массива для всех  $i \in [1, I]$  и  $j \in [1, J]$  определяются в соответствии со следующим правилом:

$$q_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если условие (5) не выполняется,} \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Площадь зоны радиоизлучения ЭВМ за пределы контролируемой зоны (КЗ) при ее расположении в допустимых местах объекта информатизации определяется из выражения

$$s_{ij} = \max S_{\text{изл}ijf}, \forall i \in [1, I]; j \in [1, J]; f \in [F_{\text{мин}}, F_{\text{макс}}], \quad (6)$$

где  $S_{\text{изл}ijf}$  – площадь радиоизлучений ЭВМ за пределы КЗ при ее расположении в конкретном месте объекта информатизации на априорно обнаруженной частоте  $f$ ;  $f$  – значение частоты радиоизлучения ЭВМ;  $[F_{\text{мин}}, F_{\text{макс}}]$  – диапазон частот, в котором осуществлялись исследования ЭВМ;  $i$  – порядковый номер строки массива со значениями суммарной площади излучений ЭВМ за пределы КЗ;  $j$  – порядковый номер столбца массива со значениями суммарной площади излучений ЭВМ за пределы КЗ.

Площадь радиоизлучения ЭВМ за пределы КЗ в  $n$ -м направлении  $S_{\text{изл}nijf}$  определяется по формуле:

$$S_{\text{изл}nijf} = \sum_{n=1}^N S_{\text{изл}nijf}, \forall i \in [1, I]; j \in [1, J]; f \in [F_{\text{мин}}, F_{\text{макс}}], \quad (7)$$

$n$  – условный номер направления радиоизлучения ЭВМ;  $N$  – максимальное количество направлений исследований излучений ЭВМ.

Площадь радиоизлучения ЭВМ за пределы КЗ в  $n$ -м направлении для всех  $i \in [1, I]$ ,  $j \in [1, J]$ ,  $f \in [F_{\text{мин}}, F_{\text{макс}}]$  и  $n \in [1, N]$  определяется из выражения:

$$S_{\text{изл}nijf} = \begin{cases} S_{\text{ЭВМ}nijf} - S_{\text{КЗ}n}, & \text{если излучение ЭВМ выходит за пределы КЗ} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (8)$$

где  $S_{\text{ЭВМ } nijf}$  – площадь радиоизлучения ЭВМ при ее расположении в конкретном месте объекта информатизации на априорно обнаруженной частоте  $f$  в  $n$ -м направлении;  $S_{\text{кз } n}$  – площадь контролируемой зоны в  $n$ -м направлении.

Площадь радиоизлучения ЭВМ при ее расположении в конкретном месте объекта информатизации на априорно обнаруженной частоте  $f$  в  $n$ -м направлении

$$S_{\text{ЭВМ } nijf} = \frac{1}{2} D_{\text{изл } (n-1)ijf} D_{\text{изл } nijf} \sin \varphi, \forall i \in [1, I]; j \in [1, J]; f \in [F_{\text{min}}, F_{\text{max}}]; n \in [1, N], \quad (9)$$

где  $D_{\text{изл } nijf}$  – дальность радиоизлучений ЭВМ на направлении  $n$ ;  $\varphi$  – угол между двумя ближайшими исследуемыми направлениями радиоизлучения ЭВМ.

Выходными данными решения данной задачи является массив  $\|S\|$ , каждый элемент которого  $s_{ij}$  характеризует качество размещения ЭВМ в конкретном месте объекта информатизации.

Задачу оптимизации размещения ЭВМ в объекте информатизации предлагается формулировать следующим образом: найти целочисленный набор  $A_{ij}$ , при котором целевая функция (10)

$$S = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J s_{ij} A_{ij} \quad (10)$$

будет минимальна для всех  $i \in [1; I]$  и  $j \in [1; J]$  при следующих ограничениях:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I A_{ij} \leq 1, \forall j \in [1, J], \\ \sum_{j=1}^J A_{ij} \leq 1, \forall i \in [1, I], \\ A_{ij} \in \{1; 0\}, \forall i \in [1, I], j \in [1, J], \end{cases} \quad (11)$$

где  $A_{ij}$  – параметр управления, характеризующий область допустимых решений рассматриваемой оптимизационной задачи.

Для решения рассматриваемой оптимизационной задачи авторами был выбран метод Мака, использование которого позволило для типовых размерностей решения задачи обеспечить выбор местоположения ЭВМ в масштабе времени, близком к реальному. Учитывая ограничения по объему изложения материала, обоснование выбора метода Мака в данной статье не производится.

## Результаты

Разработанная методика была реализована в программном продукте, который позволяет моделировать зоны радиоизлучений ЭВМ в заданном объекте информатизации, например изображенном на рис. 1. Рассматриваемый объект информатизации состоит из двух комнат и тамбура. Предположим, что в комнатах обеспечивается выполнение требований, предъявляемых к контролируемым зонам. Требуется оптимизировать размещение ЭВМ в помещении №1.

Некоторые допустимые варианты решения данной задачи при условии, что размещение переменных элементов не изменяется, представлены на рис. 2, а–в. Вариант размещения ЭВМ, представленный на рис. 2, в, является квазиоптимальным по критерию минимизации зоны радиоизлучений за пределы контролируемой зоны.

Анализ результатов моделирования зон излучений ЭВМ (рис. 2, а–в) позволяет сделать следующие выводы:

- реальная зона радиоизлучений ЭВМ при ее размещении в объекте информатизации меньше потенциальной зоны излучений, определяемой в лабораторных условиях;

- затухание электромагнитного поля в различных направлениях зависит от особенностей конструкции объекта информатизации и свойств переменных элементов, а также относительных координат их размещения;

- оптимизация размещения ЭВМ в объекте информатизации позволяет уменьшить суммарную площадь излучений ЭВМ за пределы КЗ, обеспечивает наглядное представление о потенциальных направлениях перехвата информации через канал ПЭМИН.

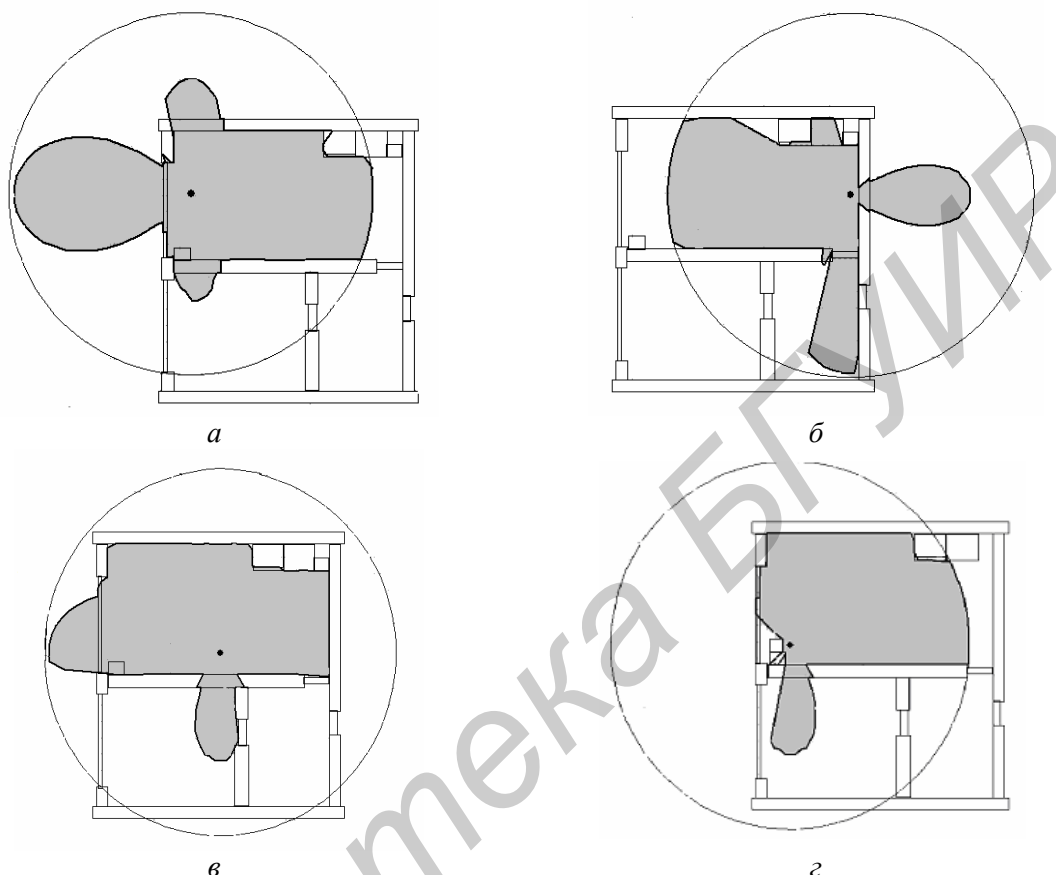


Рис. 2. Результаты моделирования зон радиоизлучений ЭВМ при ее размещении в различных точках объекта информатизации

Следует отметить, что в ходе исследований разработанного программного продукта была выявлена возможность обеспечить еще большее снижение уровня суммарных радиоизлучений ЭВМ за пределы КЗ [7] за счет рационализации размещения переменных элементов объекта информатизации. На рис. 2,г видно, что в результате изменения места расположения сейфа и последующего решения оптимизационной задачи о размещении ЭВМ в объекте информатизации величина излучений ЭВМ за пределы КЗ была снижена до уровня, существенно затрудняющего перехват обрабатываемых данных.

### Заключение

Разработанная методика позволяет определять квазиоптимальное место размещения ЭВМ в объектах информатизации по критерию минимизации суммарного уровня излучений за пределы контролируемой зоны при условии фиксированного места расположения переменных объектов и служит дополнением к используемым методам определения радиуса радиоизлучений ЭВМ в защищаемом помещении. Программный продукт, в котором реализованы алгоритмы предложенной методики, позволяет визуализировать потенциально опасные направления излучений ПЭМИН с учетом затуханий и отражений электромагнитной волны при ее прохождении через переменные и конструктивные элементы объекта информатизации. В случае невозможности обеспечить снижение информативного излучения ЭВМ на границе КЗ до уровня, затрудняющего его перехват техническими средствами разведки злоумышленника, рекоменду-

ется применять пассивные средства защиты, устанавливаемые на потенциально опасных направлениях.

В перспективе предложенная методика может быть усовершенствована в направлении решения задачи планирования размещения переменных элементов в объекте информатизации.

## **OPTIMIZATION OF THE PLACEMENT OF COMPUTERS IN THE OBJECTS OF INFORMATION TO MINIMIZE THEIR ELECTROMAGNETIC RADIATION EMANATION**

L.L. UTSIN, H.M. KRIAD, M.A. SABERIAN

### **Abstract**

The approach to optimize the placement of computers in the objects of information by minimizing the level of spurious electromagnetic radiation and interference outside the controlled area was proposed on the basis of research capabilities of the developed software, intended for the construction of the emission bands of electronic computers in the objects of information.

### **Список литературы**

1. *Утин Л.Л., Григорьев В.Л., Кред Х.М.* // Докл. БГУИР. 2010. №7(53). С 53–58.
2. *Меньшаков Ю.К.* Защита объектов и информации от технических средств разведки. М., 2002.
3. *Малюк А.А.* Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации. М., 2004.
4. *Зайцев А.П.* Технические средства и методы защиты информации. М., 2009.
5. *Лыньков Л.М., Борботько Т.В.* Основы защиты информации. Минск, 2007.
6. *Утин Л.Л., Кред Х.М.* // Инженерный вестник. 2010. №2(30). С. 27–31.
7. *Утин Л.Л., Кред Х.М.* // Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ-БГУИР: тезисы докл. Междунар. науч.-тех. конф., Минск 19 марта 2009. С. 176–177.

УДК 519.711.3

## ПОСТРОЕНИЕ МНОГОМЕРНОГО НЕЧЕТКОГО РАСПОЗНАВАТЕЛЯ НА ОБУЧАЮЩЕМ МНОЖЕСТВЕ

А.Р. САМКО, Н.Л. БОБРОВА, О.В. ГЕРМАН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 27 сентября 2011

Работа содержит описание модели многомерного нечеткого распознавателя на основе классифицирующего дерева, которое обеспечивает следующие преимущества: модель не использует функции нечеткой меры для оценки степени сходства нечетких векторов; модель ориентирована на вход векторов и не зависит от взаимного или группового соотношения элементов входных векторов. Это обстоятельство делает ненужной процедуру обучения, которая имеет решающее значение в моделях нейро-сетей с экспертом

*Ключевые слова:* распознавание, нечеткий распознаватель, классифицирующее дерево.

### Введение

Проблема реализации нечеткого распознавателя может решаться с разных позиций, которым присущи те или иные ограничения.

Часто применяют методы нечеткого логического типа Мамдани, Сугено, Ларсена и т.д. [1, 2]. Эти методы требуют определения меры близости входного экземпляра  $x' = \langle x'_1, \dots, x'_n \rangle$ , и посылочной части каждого логического правила, представленного в форме «если  $x_1 = a_1 \& \dots \& x_n = a_n$ , то  $y(\mu_y)$ ».

Данная задача не имеет простого (видимого) решения тогда, когда диапазоны изменения значений  $x_i (i = \overline{1, n})$  не известны заранее.

Можно рассмотреть подход на основе нечетких нейро-сетевых моделей [3]. Его ограничение состоит в том, что функция распознавания может быть весьма сложной, так что-либо процесс обучения окажется невозможным с практической точки зрения, либо качество распознавателя будет низким.

Большая часть алгоритмов нечеткого распознавания [4] использует функцию нечеткой меры для определения расстояния от входного образца до произвольного кластера. Выбор функций нечеткой меры в значительной степени субъективен и эвристичен.

В настоящей работе предлагается модель нечеткого многомерного распознавателя на основе классифицирующего дерева, исследование которого для четких объектов сообщалось в [5, 6]. С некоторыми модификациями это модель вполне может служить целям нечеткого распознавания. Достоинства описываемой модели таковы:

- она не использует функции нечеткой меры для оценки близости нечетких объектов;
- она ориентирована на большую размерность входных объектов и не критична к наличию индивидуальной или групповой корреляции разрядов входных объектов. Это обстоятельство отменяет необходимость в обучении распознавателя в смысле, принятом в нейро-сетевых моделях.



## Классифицирующее дерево

Ограничимся фрагментарным описанием концепции иерархического классифицирующего дерева, поскольку детали его построения можно найти в [5, 6].

В качестве примера сошлемся на рис. 1.

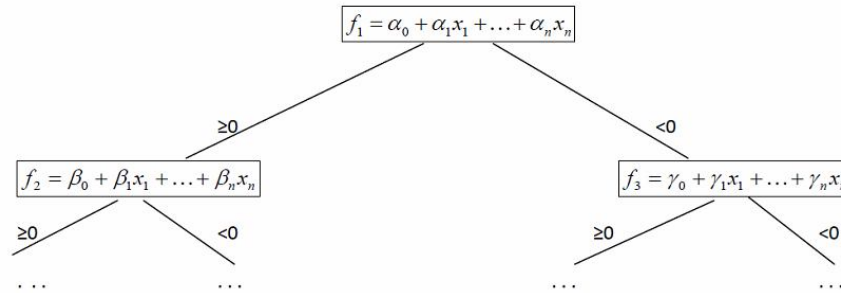


Рис. 1. Иерархическое классифицирующее дерево

В узлах дерева помещены линейные дискриминаторные функции вида  $f_v = \sum_{i=0}^n \mu_i x_i$  (где  $x_0=1$ ). Пусть на вход системы поступает объект  $x' = \langle x'_1, \dots, x'_n \rangle$ . Вычисляется значение  $f_1 = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n$  в корневом узле дерева. Если это значение  $\geq 0$ , то переходим в вершину для вычисления  $f_2 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n$ , в противном случае – в вершину  $f_3 = \gamma_0 + \gamma_1 x_1 + \dots + \gamma_n x_n$ . Процесс последовательно распространяется на последующие вершины дерева, выбор которых зависит от значения функции, вычисленного в родительской вершине. Рано или поздно попадаем в вершину, являющуюся тупиковой (листовой), которая однозначно определяет, к какому классу принадлежит объект  $x$ .

Построение дерева и получение дискриминаторных функций в его узлах основаны на использовании метода устранения невязок [7] как частного варианта симплексного алгоритма для задачи линейного программирования.

Иерархическое классифицирующее дерево строится на основе обучающего множества, представленного экспертом (-ами). Типичный вид обучающего множества приведен в табл. 1.

Таблица 1. Обучающее множество

NN	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_n$	Кластер
1	$x_1^1$	$x_2^1$		$x_n^1$	$K_1$
2	$x_1^2$	$x_2^2$		$x_n^2$	$K_2$
3	$x_1^3$	$x_2^3$		$x_n^3$	$K_2$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$N$	$x_1^N$	$x_2^N$		$x_n^N$	$K_1$

Количество кластеров  $P$  в общем случае более двух; в «базовом» случае  $P=2$  (случай  $P>2$  просто сводится к построению нескольких деревьев, для каждого из которых  $P=2$ ).

Исследование зависимости размера дерева от характера вероятностного распределения значений входных векторов, вида пересечений различных кластеров представляют самостоятельную задачу. Отметим, что эти размеры во многих практических ситуациях определяют дерево с числом ярусов, не превосходящих несколько единиц даже для обучающих таблиц с сотней строк.

### Задача нечеткой многомерной классификации

Обучающее множество зададим в качестве иллюстраций в виде табл. 2 (случай трехмерных объектов).

Таблица 2. Обучающее множество трехмерных объектов

NN	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Кластер	Мера принадлежности ( $\mu$ )
1	0	1	-2	A	1,0
2	0	0	-1	A	0,8
3	-1	-5	-4	B	1,0
4	2	5	3	B	0,9
5	-1	-1	0	A	0,6
6	3	3	7	B	1,0
7	-1	1	-1	A	1,0

Здесь семь объектов, для которых указаны значения нечеткой меры ( $\mu_i$ ), принадлежности к соответствующему кластеру.

Будем интерпретировать нечеткую меру принадлежности кластеру, как, например, субъективную вероятность, с которой эксперт относит данный объект в соответствующий кластер.

Мы хотим построить на основании табл. 2 классифицирующее дерево. Качество распознавания можно связать со статистическим критерием  $\chi^2$  таким образом. Пусть  $q_k=0$ , если объект с номером  $k$  из табл. 2 отнесен в кластер  $B$ , и  $q_k=1$ , если объект отнесен в кластер  $A$ . Вычисляем критерий  $\chi^2$ :

$$\chi_p^2 = \sum_{\substack{r=1 \\ \mu_k \neq 0}}^N \frac{(\mu_k - q_k)^2}{\mu_k}. \quad (1)$$

Чтобы считать распознавание удовлетворительным с точки зрения (1), необходимо

$$\chi_p^2 \leq \chi_{\text{табл}}^2(\alpha, n^{\text{св}}), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – выбранная вероятность ошибки, например,  $\alpha=0,05$ ;  $n^{\text{св}}$  – число степеней свободы.

Число степеней свободы  $n^{\text{св}}$  зависит от количества независимых коэффициентов в линейной дискриминаторной функции  $f_v = \sum_{i=0}^r \alpha_i x_i$ . Проблема состоит в том, что в классифицирующем дереве несколько узлов, в общем случае, и для каждого узла используется собственная дискриминаторная функция, определенная на собственном обучающем множестве. Пусть мощность этого обучающего множества есть  $M_z$ ,  $f_z = \sum_{i=0}^r \alpha_i x_i$ . Тогда число степеней свободы

$$n_z^{\text{св}} = M_z - r. \quad (3)$$

Из (2) следует, что наилучшее качество обеспечивается тогда, когда

$$\begin{cases} \mu_k \geq 0,5 \rightarrow q_k = 1 \\ \mu_k < 0,5 \rightarrow q_k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Это условие положено в основу нечеткого распознавателя, описанного в [8], однако метод построения такого распознавателя при большом числе объектов в обучающем множестве может оказаться крайне трудоемким, т.к. связан с решением  $NP$ -полной задачи.

Данная статья излагает метод, который позволяет сохранить стратегию устранения невязок в качестве основы построения нечеткого классифицирующего дерева, отказавшись от требования (4), но сохранив условие (2). Таким образом, даже если обучающаяся таблица содержит сотни объектов, сложность построения нечеткого классифицирующего дерева не выходит за пределы сложности симплексного алгоритма.

## Построение нечеткого классифицирующего дерева

Ограничим рассмотрение построением одного узла. По данным табл.2 составляем неравенства с неизвестными коэффициентами  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  :

$$\begin{aligned}
 \alpha_0 + \alpha_1 \cdot 0 + \alpha_1 \cdot 1 + \alpha_3 \cdot (-2) &\geq 0 & (1,0) \\
 \alpha_0 + \alpha_1 \cdot 0 + \alpha_2 \cdot 0 + \alpha_3 \cdot (-1) &\geq 0 & (0,8) \\
 \alpha_0 - \alpha_1 \cdot 1 - \alpha_2 \cdot 5 - \alpha_3 \cdot 4 &< 0 & (1,0) \\
 \alpha_0 - \alpha_1 \cdot 2 + \alpha_2 \cdot 5 + \alpha_3 \cdot 3 &< 0 & (0,9) \\
 \alpha_0 + \alpha_1 \cdot (-1) + \alpha_2 \cdot (-1) + \alpha_3 \cdot 0 &\geq 0 & (0,6) \\
 \alpha_0 + \alpha_1 \cdot 3 + \alpha_2 \cdot 3 + \alpha_3 \cdot 7 &< 0 & (1,0) \\
 \alpha_0 + \alpha_1 \cdot (-1) + \alpha_2 \cdot 1 + \alpha_3 \cdot (-1) &\geq 0 & (1,0)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Каждое неравенство получаем в виде  $\sum_{i=0}^3 \alpha_i \cdot x_i \geq 0$

где  $x'_0 = 1$ ,  $x'_i$  – координата вектора из табл. 2. Каждому неравенству приписывается соответствующая мера нечеткости. Далее заменяем каждое жесткое неравенство ( $<$ ) нежестким ( $\leq$ ) с помощью дополнительного малого слагаемого и приводим все неравенства к виду  $\geq$ . Заметим, что в (5) неравенства вида  $\geq 0$  относятся к кластеру  $A$ , а неравенства вида  $< 0$  – к кластеру  $B$ . Стартовая система имеет такой вид:

$$\begin{aligned}
 \alpha_0 + \alpha_1 \cdot 0 + \alpha_1 - \alpha_3 \cdot 2 &\geq 0 & (1,0) \\
 \alpha_0 + \alpha_1 \cdot 0 + \alpha_2 \cdot 0 - \alpha_3 \cdot 1 &\geq 0 & (0,8) \\
 -\alpha_0 + \alpha_1 + 5 \cdot \alpha_2 + 4 \cdot \alpha_3 &\geq 1 & (1,0) \\
 -\alpha_0 + 2 \cdot \alpha_1 - 5 \cdot \alpha_2 - 3 \cdot \alpha_3 &\geq 1 & (0,9) \\
 \alpha_0 - \alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 \cdot 0 &\geq 0 & (0,6) \\
 -\alpha_0 - 3 \cdot \alpha_1 - 3 \cdot \alpha_2 - 7 \cdot \alpha_3 &\geq 1 & (1,0) \\
 \alpha_0 - \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 &\geq 0 & (1,0)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Стратегия устранения невязок (СУН) реализуется в две стадии. На первой стадии система неравенств приводится к виду с четырьмя (по числу переменных) базовыми неравенствами вида  $\alpha'_k \geq 0$ , устанавливающими неотрицательность переменных. С этой целью строим замены для переменных из неравенств с положительной правой частью. Например, из

$$-\alpha_0 + \alpha_1 + 5 \cdot \alpha_2 + 4 \cdot \alpha_3 \geq 1$$

получим

$$\begin{aligned}
 -\alpha_0 &\geq 1 - \alpha_1 - 5 \cdot \alpha_2 - 4 \cdot \alpha_3 \\
 -\alpha_0 &= 1 - \alpha_1 - 5 \cdot \alpha_2 - 4 \cdot \alpha_3 + \omega_0
 \end{aligned}$$

И далее  $\alpha_0 = -1 + \alpha_1 + 5 \cdot \alpha_2 + 4 \cdot \alpha_3 - \omega_0$ . Проводим эту замену в систему (6). Затем аналогичным образом заменяем  $\alpha_1, \alpha_2$  и  $\alpha_3$ . В результате стадия 1 заканчивается следующей системой:

$$\begin{aligned}
 \omega_1 &\geq 0 & (1,0) \\
 \omega_3 &\geq 0 & (0,8) \\
 \omega_0 &\geq 1 & (1,0) \\
 \frac{2}{3} \omega_1 - \frac{9}{8} \omega_0 - 9 \cdot \omega_3 + \frac{7}{2} \omega_2 &\geq \frac{17}{8} & (0,9) \\
 \omega_2 &\geq 0 & (0,6) \\
 -\frac{11}{8} \omega_0 + \frac{11}{2} \omega_1 + \frac{13}{2} \omega_2 - 19 \cdot \omega_3 &\geq \frac{19}{8} & (1,0) \\
 -\frac{7}{8} \omega_0 + \frac{3}{2} \omega_1 + \frac{9}{2} \omega_2 - 3 \omega_3 &\geq \frac{3}{8} & (1,0)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

На второй стадии СУН последовательно устраняются невязки.

1. Невязкой называется неравенство ( $\geq$ ) с положительной правой частью.
2. Стоп-невязкой называется невязка, в левой части которой нет положительных коэффициентов при переменных.

СУН требует выражать из невязки переменную с положительным коэффициентом. Для случая нечеткой системы неравенств в первую очередь используем невязки с мерой (1,0). Так, из предпоследнего неравенства в (7) получим

$$\omega_1 = \frac{19}{44} + \frac{1}{4}\omega_0 - \frac{13}{11}\omega_2 + \frac{38}{11}\omega_3 + z_1 \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), получим новую систему

$$\frac{1}{4}\omega_0 - \frac{13}{11}\omega_2 + \frac{38}{11}\omega_3 + z_1 \geq -\frac{19}{44} \quad (1,0)$$

$$\omega_3 \geq 0 \quad (0,8)$$

$$\omega_0 \geq 1 \quad (1,0)$$

$$-\frac{3}{4}\omega_0 + \frac{19}{11}\omega_2 - \frac{42}{11}\omega_3 + \frac{3}{2}z_2 \geq \frac{65}{44} \quad (0,9) \quad (9)$$

$$\omega_2 \geq 0 \quad (0,6)$$

$$z_3 \geq 0 \quad (1,0)$$

$$-\frac{1}{2}\omega_0 + \frac{30}{11}\omega_2 - \frac{24}{11}\omega_3 + \frac{3}{2}z_1 \geq -\frac{3}{11} \quad (1,0)$$

Хотя СУН заканчивает итерации, когда нет невязок, в случае нечеткой системы неравенств мы ориентируемся на следующее условие. Если невязок нет среди неравенств с мерой (1,0), то СУН останавливает итерации.

Мы как раз имеем это условие. Подставим в систему (9) нулевые значения для переменных:  $\omega_0 = 0, \omega_2 = 0, \omega_3 = 0, z_1 = 0$ . Все неравенства будут выполнены, кроме четвертого по порядку с мерой (0,9). Проверим значение критерия  $\chi_p^2$ . Вычисляем  $\chi_p^2$  только (!) для нечетких неравенств, т.к. все четкие неравенства выполнены.

$$\chi_p^2 = \frac{(0,8-1)^2}{0,8} + \frac{(0-0,9)^2}{0,9} + \frac{(1-0,6)^2}{0,6} = 1,21$$

Табличное значение  $\chi_m^2$  находим для  $\alpha=0,05$  и числа степеней свободы  $n^{cb} = 7 - 4 = 3$  (если неравенство использовано для описания четырех коэффициентов). Имеем  $\chi_m^2 = 7,81 > \chi_p^2$ . Следовательно, найденное нами решение статистически значимо (адекватно) и должно быть принято. Отправляясь от «решения»  $\omega_0 = 0, \omega_2 = 0, \omega_3 = 0, z_1 = 0$ , получим (на основании произведенных подстановок)

$$\alpha_0 = -\frac{1}{11} \quad \alpha_1 = -\frac{19}{44} \quad \alpha_2 = \frac{15}{44} \quad \alpha_3 = -\frac{1}{11}$$

Таким образом, нами получено линейное дискриминаторное неравенство в корневом узле дерева вида

$$-\frac{1}{11} - \frac{19}{44}x_1 + \frac{15}{44}x_2 - \frac{1}{11}x_3 \quad (\geq 0)$$

Полученное дерево состоит из одного корневого узла.

При выполнении СУН для системы с нечеткими неравенствами используем следующие (кроме приведенных) правила:

- если стоп-невязка возникла в неравенстве с мерой  $\mu=1$  (неравенство четкое), то это неравенство исключается из системы, как и в случае четких неравенств [5, 6];

- если стоп-невязка возникла в неравенстве с нечеткой мерой  $\mu < 1$ , а среди четких неравенств ( $\mu = 1$ ) нет невязок, то проверяем критерий  $\chi_p^2 \leq \chi_m^2$ . При выполнении критерия СУН завершает операции, и получаем линейную дискриминаторную функцию для рассматриваемого узла. Если  $\chi_p^2 > \chi_m^2$ , то стоп-невязка удаляется из числа неравенств текущей системы;

- если невязок вообще нет, но  $\chi_p^2 > \chi_m^2$ , то последовательно заменяем каждое нечеткое неравенство с мерой  $\mu < 1$  набором четких неравенств (с  $\mu = 1$ ), как показано на следующем примере.

Пусть, например, нечеткое неравенство таково:

$$\varepsilon_1 \cdot x_1 + \varepsilon_2 \cdot x_2 + \dots + \varepsilon_n \cdot x_n \geq \varepsilon_0 \quad (0,6) \quad (10)$$

Мера  $\mu = 0,6$  интерпретируется как «факт», что в среднем в трех случаях из пяти неравенство выполняется, а в двух – нет. Сгенерируем случайным образом пять векторов  $\varepsilon_i$  в  $\Delta$ -окрестности точки  $\langle \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \rangle$  для достаточно малого  $\Delta$  ( $\Delta \approx 0,05 \cdot |\varepsilon_i|$  для коэффициента  $\varepsilon_i$ ). Из этих векторов получим коэффициенты для трех неравенств смысла  $\geq \varepsilon_0$  и двух – смысла  $< \varepsilon_0$ . Нечеткое неравенство (10) заменяем на пять четких неравенств.

Из исключенных неравенств (стоп-невязок) формируем новую систему и выполняем СУН на этой системе для формирования нового узла классифицирующего дерева, в который будет выполнен переход при выполнении дискриминаторного неравенства в родительском узле [5, 6].

### Заключение

Изложенная техника естественным образом обобщает метод построения классифицирующего дерева для четких объектов [5, 6]. Анализ качества распознавания увязан с критерием  $\chi_1^2$ , что ориентирует систему на большое число объектов в обучающем множестве. Достоинства модели распознавателя связаны с отсутствием привязки к закону распределения и наличию корреляционной связи между группами разрядов (признаков).

## BUILDING MULTIDIMENSIONAL FUZZY RECOGNIZER ON A LEARNING SET

A.R. SAMKO, N.L. BOBROVA, O.V. GERMAN

### Abstract

The paper contains a model of a multidimensional fuzzy recognizer on the basis of a classifying tree which provides the following advantages: the model does not use a fuzzy measure function to evaluate a degree of similarity of fuzzy vectors; the model is oriented at highly dimension input vectors and does not depend on the mutual or group correlation of the elements of input vectors. This circumstance makes not necessary a learning procedure which is crucial in neuro-nets with a teacher model.

### Список литературы

1. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб., 2005.
2. Ярушклина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. М., 2004.
3. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети. М., 2006.
4. Вятченин Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации. Мн., 2004.
5. Герман О.В., Дорожкина Н.Н. // Вестник Ставропольского университета. 1999. Вып. 20. С. 85–99.
6. Герман О.В., Боброва Н.Л., Самко А.Р. // Докл. БГУИР. 2011. №4(58). С. 86–93.
7. Герман О.В., Дорожкина Н.Н., Самко А.Р. // Труды БГТУ. 2007. Сер. VI. Вып. XV. С. 160–164.
8. Герман О.В., Дорожкина Н.Н., Самко А.Р. // Труды БГТУ. 2007. Сер. IX. Вып. XVI. С. 116–118.

УДК 621.382.001.63

## ОБЪЕМНО-ПЛАНАРНЫЙ КОНСТРУКТИВНЫЙ ВАРИАНТ МИКРОДАТЧИКА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ НА НАНОПОРИСТОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ

Н.И. МУХУРОВ

*Институт физики НАН Беларуси  
пр. Независимости, 68, Минск, 220072, Беларусь*

*Поступила в редакцию 17 декабря 2011*

Рассматривается объемно-планарный вариант конструктивного построения и создания миниатюрного емкостного микродатчика относительной влажности на основе нанопористых подложек из анодного оксида алюминия.

*Ключевые слова:* микродатчик относительной влажности, объемно-планарная конструкция, анодный оксид алюминия, характеристики

### Введение

Одним из востребованных типов датчиков состояния окружающей среды является датчик относительной влажности [1, 2]. По принципу преобразования детекторы влажности делятся на две группы: емкостные и резистивные. Емкостные преобразователи обладают практически линейной характеристикой преобразования «влажность-емкость» и являются более точными, чем резистивные. У резистивных преобразователей наблюдается линейная зависимость логарифма сопротивления от влажности [3].

Детекторы с преобразованием «влажность-емкость» являются элементарными первичными преобразователями и требуют дополнительной электронной обработки для преобразования аналогового сигнала (емкости) в цифровой (электрическое напряжение). Резистивные преобразователи являются менее точными и имеют более выраженную зависимость от температуры. Без использования цепей температурной компенсации их можно применять в помещениях со стабильными температурными условиями: дома, складские помещения, овощехранилища и др.

Среди различных чувствительных к относительной влажности материалов достаточно привлекательным является нанопористый анодный оксид алюминия (АОА) [4, 5]. Основные конструктивные варианты датчика влажности на основе АОА представлены планарной и объемной конструкциями, выполненными в виде МДМ (металл-диэлектрик-металл) конденсатора с тонким проницаемым верхним электродом или встречно-штыревой схемой тонкопленочных электродов с нанопористым чувствительным слоем, соответственно. МДМ-конденсатор состоит из алюминиевой подложки, на которой методом электрохимического окисления сформирован анодный окисел [6]. Вторым электродом служит тонкий влагопроницаемый слой металла (чаще всего золота, реже алюминия, серебра, палладия или платины). В качестве подложки используются алюминиевая фольга, кремниевые или керамические подложки с тонкими (~1 мкм) слоями напыленного алюминия. Характеристики алюминиево-оксидных датчиков в основном определяются свойствами анодных пленок оксида алюминия, которые, в свою очередь, зависят от состава электролита и режимов анодирования.

Упрощенная модель строения анодного оксида алюминия предполагает, что он состоит из совокупности плотно упакованных элементарных ячеек тетраэдров с наноразмерными по-

рами в центре каждой из ячеек и обладает адсорбционной активностью за счет наличия гидроксильных групп на развернутой удельной поверхности.

Толщина пленки оксида алюминия влияет на чувствительность датчика и определяет его динамические характеристики. Датчики с толщиной окисной пленки ~ 1,5–2,5 мкм позволяют измерять влажность в пределах от 20 до 100%. В датчиках влажности фирмы Shaw пористую пленку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  перед нанесением верхнего электрода пропитывают насыщенными растворами солей (например,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{CaCl}$ ). Недостатком датчиков такого типа является высокая чувствительность к перегрузкам по влажности. В датчиках фирмы Panametrics (США) уменьшили толщину слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 0,2 мкм и менее, что позволило значительно увеличить быстродействие датчика, чувствительность в области низких концентраций влаги (<1%) и уменьшить размеры. Однако для более широкого диапазона измерений и точностей регистрации значений относительной влажности предпочтительным представляется объемный конструктивный вариант.

### Особенности конструкций датчика относительной влажности воздуха на основе нанопористого оксида алюминия

Специфика получения микропористого слоя оксида электрохимическим окислением пластины алюминия располагает к относительно простому конструктивному решению датчика относительной влажности воздуха, заключающемуся в нанесении тонкопленочных электродов МДМ-конденсатора на пористую (контактирующую с электролитом) поверхность, а алюминиевая подложка, на которой сформирован оксидный слой, служит другим электродом конденсатора (рис. 1). К недостаткам такой конструкции относится трудность нанесения полупрозрачного электрода на пористой поверхности оксида алюминия. Тонкий слой металла имеет высокое удельное сопротивление, что увеличивает значения активных потерь в конденсаторной структуре. Относительно толстые пленочные покрытия частично или полностью закрывают поры в диэлектрике, и снижаются сорбционные свойства поверхности оксида.

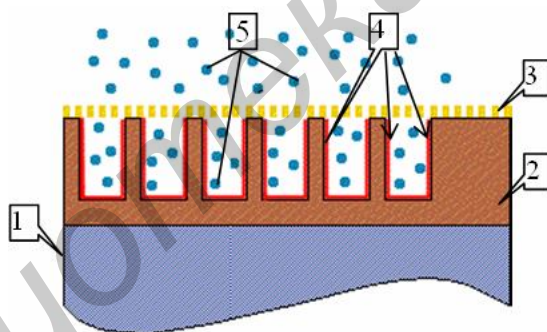


Рис. 1. Схематическое изображение фрагмента емкостного датчика МДМ-конструкции на основе нанопористого анодного оксида алюминия: 1 – алюминиевая подложка, 2 – АОА, 3 – пористый тонкий электрод, 4 – адсорбционная поверхность, 5 – молекулы воды

*Емкостная структура со встречно-штыревыми толстопленочными электродами в объеме диэлектрика.*

Принципиально отличное конструктивное решение объемного емкостного датчика относительной влажности воздуха иллюстрируется рис. 2. Наличие перпендикулярных обеим поверхностям подложки нанопор в диэлектрике предопределяет благодаря объемному фактору клин травления не более 0,05, т.е. при травлении оксида на глубину 100 мкм подтравливание края не превышает 0,1 мкм. Электроды отдельных конденсаторов выполнены в виде встречно-штыревой гребенки, и «рабочие» поверхности электродов ориентированы параллельно естественным порам оксида алюминия. Величина общей емкости конденсаторных структур определяется шириной  $h$ , длиной  $l$  штыревых гребенок для планарного конденсатора и может быть представлена в виде

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon h \cdot l \cdot n}{d},$$

где  $d$  – расстояние между соседними штырями гребенки, образующими элементарную ячейку составного конденсатора, а  $n$  – количество промежутков между штырями гребенок. Для построения вторичных преобразователей (емкость-напряжение) предпочтительны относительно высокие значения емкостей, которые можно достичь увеличением ширины гребенок  $h$  за счет большей толщины подложки оксида алюминия. Активные потери за счет проводимости здесь незначительны. Диэлектрик использован со «сквозными» порами, что снижает времена отклика и релаксации параметров датчика.

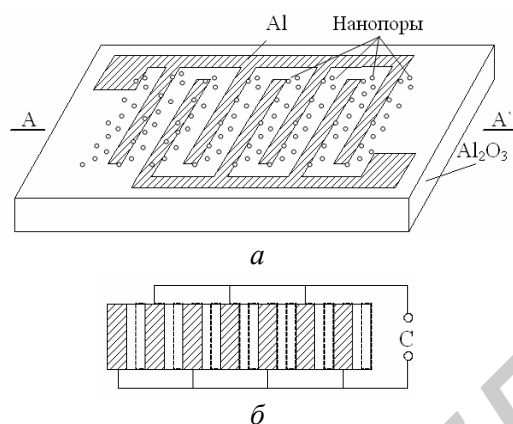


Рис. 2. Емкостная структура с электродами в виде встречно-штыревой гребенки (а), сечение структуры по AA' (б)

*Емкостная структура с тонкопленочными встречно-штыревыми электродами в объеме диэлектрика.*

Схематически структура датчика с тонкопленочными электродами на боковых стенках протравленных окон в оксиде представлена на рис. 3. Основной процесс в этом случае аналогичен процессу получения формообразующей матрицы. Подложка с перфорацией является исходной для формирования емкостной структуры. Нанесение тонкопленочных покрытий осуществляется термическим распылением соответствующего проводящего материала при размещении перфорированной подложки под углом к потоку пара распыляемого металла (электронно-лучевое испарение никеля с последующим нанесением термическим испарением серебра для уменьшения активных потерь конденсаторной структуры). При определенном соотношении ширины щели, толщины подложки и угла ориентирования подложки с использованием трафаретных масок, достигается полное запыление щелей. Геометрические размеры экспериментальных образцов датчиков относительной влажности составляли следующие значения:  $h = d = 100$  мкм, ширина полосок 100 мкм при общей площади подложки  $\sim 1$  см<sup>2</sup> (рис. 3, в). Поскольку перфорированная подложка перед нанесением пленочных покрытий отделена от алюминия, она была переведена в  $\gamma$ -модификацию с более высокой адсорбционной способностью и соответственно повышенной чувствительностью датчика к относительной влажности воздуха по сравнению с аморфной.

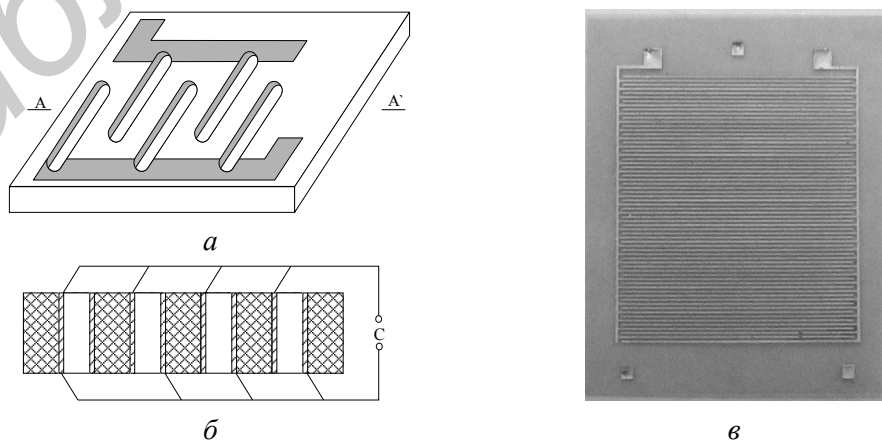


Рис. 3. Емкостная структура (фрагмент) с нанесением на боковых стенках сквозных щелей тонкопленочными электродами (а); сечение конденсатора по AA' – (б), микрофотография емкостной структуры датчика влажности на АОА (в)



На рис. 4 приведены усредненные зависимости изменения емкости датчика от относительной влажности при ее увеличении от 10 % до 90 % и уменьшении до исходных значений. Как следует из этих данных, исходные величины емкости датчика влажности составляют ~30 пФ при минимальном значении относительной влажности и ~200 пФ при ее максимальном значении, т.е. чувствительность – более 2 пФ/%. Это достаточно хороший показатель для проектирования электронной схемы преобразования аналогового сигнала в цифровой.

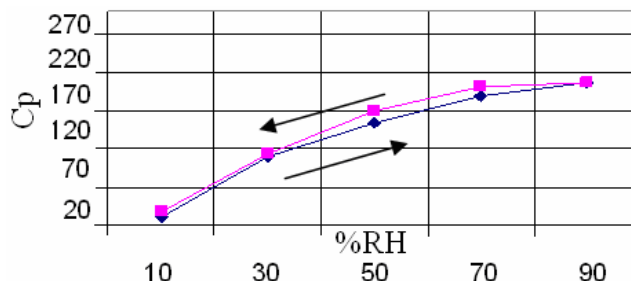


Рис. 4. Усредненные значения изменения емкости датчика при изменении относительной влажности

Проведенные температурные испытания подтвердили предполагаемые относительно небольшие изменения параметров датчика в диапазоне от минимальных до максимальных значений относительной влажности (рис. 5). При нагреве от 20 °С до 60 °С изменения усредненных значений емкости датчика колебались в пределах от 2–3 пФ при относительной влажности 10 %, до 40 пФ – при 90 %.

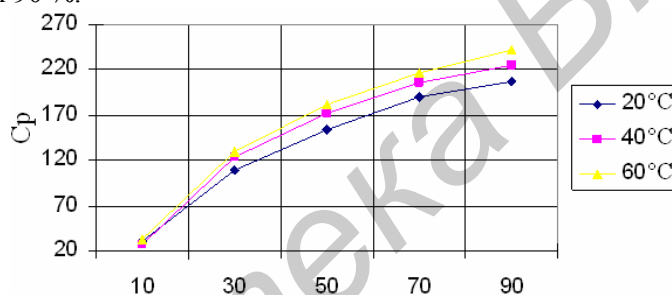


Рис. 5. Усредненные значения изменения емкости датчика при изменении относительной влажности и температуры окружающей среды

Применение технологии на основе пленок анодного оксида алюминия позволяет целенаправленно изменять зазоры между обкладками емкостной структуры, проектировать планарно-объемные конструкции дифференциальных конденсаторов и применять их для емкостных датчиков относительной влажности. Использование возможностей разработанной ранее БИС-преобразователя емкость-напряжение [7] с двумя идентичными каналами позволяет реализовать на основе двух отдельных конденсаторов как «зонд – эталон» высокоэффективные датчики влажности, в которых не требуется дополнительный датчик температуры.

### Заключение

Предложен объемно-планарный конструктивный вариант построения емкостного датчика относительной влажности с использованием нанопористой структуры анодного оксида алюминия. Для увеличения адсорбционной способности предложена термообработка подложек при температурах, обеспечивающая максимальную удельную поверхность датчика. По результатам испытаний показаны высокая чувствительность, относительно высокая точность и повторяемость характеристик датчика в диапазоне значений относительной влажности 10–90 %, в том числе при изменении температуры окружающей среды от 20 до 60 °С. Разработанный вариант может послужить прототипом для построения датчиков влажности с электронной схемой преобразования емкость-напряжение на основе БИС.

# VOLUME PLANAR VARIANT OF DESIGN OF RELATIVE HUMIDITY SENSORS ON ANODIC ALUMINA

N.I. MUKHUROV

## Abstract

The volume planar variant of design and creation of the relative humidity microsensors based anodic alumina nanoporous substrates there are examined in the article.

## Список литературы

1. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.iceweb.com.au/Analyzer/humidity\\_sensors.html](http://www.iceweb.com.au/Analyzer/humidity_sensors.html).
2. *Zhi Chen, Chi Lu.* // *Sensor Letters.* 2005. Vol. 3. P. 274–295.
3. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.alibaba.com/product-gs/467248864/analog\\_humidity\\_sensor.html](http://www.alibaba.com/product-gs/467248864/analog_humidity_sensor.html)
4. *Timar-Horvath V., Juhasz L., Vass-Varnai A. et al.* // *DTIP of MEMS & MOEMS.* Italy. 25–27. 2007.
5. *Yao L., Zheng M., Li H. et al.* // *Nanotechnology.* 2009. Vol. 20, №39. P. 395501.
6. *Ling Zh. Yu, Chen Sh.Sh., Wang J.Ch. et al.* // *Chinese Science Bulletin.* 2008. Vol. 53, №2. P. 183–187.
7. *Белоус А.И., Мухуров Н.И., Дрозд С.Е. и др.* // *Докл. БГУИР.* 2010. №4(50). С. 42–47.

УДК 681.3;007.003;007.008;65.0

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

А.В. КЛИМЕНКО

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины  
Советская, 104, Гомель, 246028, Беларусь*

*Поступила в редакцию 7 февраля 2012*

Приводятся теоретическое обоснование и технология применения динамических имитационных моделей для анализа функционирования вероятностных производственных систем. Предложена методика решения задач проектного моделирования рациональной структуры технологического цикла при наличии элементов потенциально опасного производства.

*Ключевые слова:* имитационные модели, вероятностные производственные системы, анализ функционирования, средства автоматизации моделирования, технология применения.

### Введение

Объектом исследования в работе являются производственные системы с вероятностными параметрами функционирования при наличии условий потенциальной техногенной опасности и их математические модели [1].

Управление производственной системой в контексте данной работы понимается в смысле упреждения конфликтных ситуаций в функционировании вероятностного технологического процесса. Упреждение достигается с помощью сопряженного аппаратно-программного комплекса, состоящего из средств аппаратного сопряжения с производственной системой и параллельно действующей ЭВМ.

Для разработки алгоритмических моделей управляемых производственных систем (УПС) используются следующие процедуры.

1. Декомпозиция технологического цикла по уровням иерархии технологических операций при детальном представлении алгоритма имитации компонентов.

2. Использование библиотеки агрегатов, состоящей из ограниченного числа типов агрегатов, с помощью которой при изменении состава параметров агрегатов возможно представление любой структуры технологического цикла.

3. Параметризация имитационных моделей, позволяющая проектировщику выполнять компоновку модели из ограниченного состава агрегатов в различных вариантах организации технологического цикла. В состав параметров входят параметры настройки на конфигурацию и параметры для постановки серии имитационных экспериментов.

Для описания динамики проектирования структуры технологического цикла используется представление УПС в виде вероятностного сетевого графика (ВСГР). При реализации предложенного автором подхода используется разработанная в составе авторского коллектива объектно-ориентированная среда проектного моделирования GraphModel.

Проектное моделирование структуры УПС осуществляется многократно экспертом-технологом по единой технологии. Используя функциональные возможности разработанной объектно-ориентированной среды, эксперт-технолог составляет содержательное описание технологического процесса производства.

Как правило, выполняется следующая последовательность действий: определяются управляющие переменные, выбирается состав контролируемых характеристик, детализируется режим функционирования технологического цикла, определяется технологическая схема УПС с учетом описания внешней среды. С использованием объектно-ориентированной среды GraphModel в автоматическом режиме составляются таблицы коммутации операций и последовательность их выполнения. Список запросов ресурсов для выполнения каждой технологической операции формируется в процессе моделирования в интерактивном режиме и фиксируется в базе данных имитационных моделей для дальнейшей обработки.

### **Методика решения задач проектного моделирования вероятностных производственных систем**

Для принятия проектных решений необходимо, прежде всего, определить цели исследования управляемых производственных систем. Реализация этого шага требует выполнения следующих действий:

- определения критериев качества функционирования технологического цикла;
- определения задач исследования УПС с помощью имитационных моделей;
- конкретизации обобщенного критерия качества для решения поставленных задач исследования.

На данном этапе разработки программного инструментария в качестве задач исследования рассматривались следующие:

- выбор рационального набора технологических процессов из множества выполняемых на данном предприятии по критериям минимальной стоимости их реализации и максимальной стоимости выпускаемой продукции предприятия;
- определение пропускной способности управляемой производственной системы для используемого состава оборудования, набора ресурсов и списка исполнителей;
- оценка снижения пропускной способности оборудования предприятия при заданных вероятностях выполнения ремонтных работ, возникновения аварийных ситуаций из-за некачественного ремонта при использовании изделия после его проведения;
- нахождение «узких мест» технологического цикла производства из-за сбоев оборудования и дополнительных затрат на ликвидацию отказов оборудования;
- определение математических ожиданий и дисперсий интегральных откликов расхода ресурсов, материалов, комплектующих и оборудования.

При проектном моделировании структуры технологического цикла УПС используется метод экспертных оценок. В процессе проектирования вводятся функции распределения запросов ресурсов для каждой технологической операции, устанавливаются диапазоны изменения запросов ресурсов и параметров моделирования. При этом выделяются три типа переменных: функционирования компонентов модели УПС, используемые в качестве исходной информации для «запитки» моделей; эталоны поведения ветвей технологического при верификации алгоритмов модели; характеристики сравнения проектируемых структур при проверке адекватности модели.

Перевод формального описания УПС в имитационную модель [2] осуществляется на основе формируемой в интерактивном режиме базы данных элементов модели и библиотек агрегатов-компонентов имитационных моделей [3].

Таким образом, использование объектно-ориентированной среды GraphModel при проектном моделировании оптимальной структуры технологического цикла управляемых производственных систем позволяет отделить задачу проектирования от методов и средств определения оптимальных параметров технологического цикла с последующим вынесением таких методов в соответствующую базу знаний.

### **Пример задачи оптимизации структуры технологического цикла на имитационной модели вероятностной производственной системы**

В соответствии с тестовым примером проведено составление технологической схемы реализации (ТСП) производственного цикла группой экспертов предприятия и специалистов в

области прикладной математики для обеспечения достоверного описания взаимодействия этапов производственного процесса с течением времени его реализации.

Технологическая схема реализации содержит описание элементов процесса, условия и параметры их взаимодействия. Эти данные служат исходной информацией для построения исходной математической модели, которая является отображением технологической схемы вероятностного технологического процесса производства. Установлено, что реализация предложенной методики исследования вероятностных производственных систем (ВПС) достигается последовательностью следующих двенадцати шагов.

Шаг 1. Составление технологической схемы реализации для выполнения  $h$ -го варианта организации ВПС множеством технологических операций  $\{MTXO_{ij}\}$ . Технологическая схема реализации содержит описание элементов процесса, условия и параметры их взаимодействия.

Шаг 2. Подготовка исходной информации для имитационного моделирования  $h$ -го варианта ВПС в виде двух таблиц.

1. Таблица запросов ресурсов предприятия множеством технологических операций ( $\{MTXO_{ij}\}$ ), элементами которой являются:

- количество устройств всех типов оборудования индивидуального пользования  $\{n_{1r1ij}\}$ ;
- количество типов ресурсов индивидуального пользования  $\{n_{3r3ij}\}$ ;
- количество исполнителей ( $n_{5ij}$ );
- количество бригад исполнителей ( $n_{6ij}$ ).

Запросы ресурсов  $MTXO_{ij}$ , имеющих вероятностную природу, задаются с помощью соответствующих функций распределения:

- времени и стоимости выполнения операций  $F_{1ij}(\tau)$  и  $F_{2ij}(s)$ ;
- расхода комплектующих изделий и материалов  $\{F_{3r3ij}(ko)\}$  и  $\{F_{4r4ij}(mt)\}$ .

2. Таблица надежностных характеристик оборудования.

Из-за возможных отказов  $k$ -го устройства оборудования дополнительно задаются характеристики надежности его функционирования в виде таблицы функций распределения вероятностей значений времени:

- безотказного функционирования  $\Phi_{1k}(\tau_{BO})$ ;
- восстановления работоспособности  $\Phi_{2k}(\tau_{VO})$ ;
- ликвидации аварий оборудования  $\Phi_{3k}(\tau_{AV})$ .

Для случаев ликвидации отказов оборудования дополнительно задаются:

- вероятность возникновения аварий при отказах оборудования  $P_{AVK}$ ;
- функции распределения вероятностей значений дополнительной стоимости операции ликвидации аварии  $\Phi_{4k}(\Delta s)$ .

Эти данные служат исходной информацией для построения имитационной модели полумарковского процесса, являющегося отображением технологической схемы производственного цикла.

Шаг 3. Перевод технологической схемы реализации в полумарковскую модель, отображающую функционирование технологического цикла, в результате чего формируется таблица коммутации  $\{MTXO_{ij}\}$ , согласно графовой структуре их реализации в составе  $h$ -го варианта вероятностного технологического процесса производства.

Шаг 4. Инициализация имитационной модели и ввод исходной информации в виде таблиц на основе множеств  $G_h = \{F_{1ijh}(\tau); F_{2ijh}(s); F_{3r3ijh}(ko); F_{4r4ijh}(mt)\}$  и  $Z_h = \{\Phi_{1kh}(\tau_{BO}); \Phi_{2kh}(\tau_{VO}); \Phi_{3kh}(\tau_{AV}); P_{AVKh}; \Phi_{4kh}(\Delta s)\}$ .

Шаг 5. Задание числа реализаций процедуры Монте-Карло ( $N_M$ ).

Шаг 6. Постановка серий имитационных экспериментов и усреднение статистик имитации на основе стандартных пакетов обработки статистики.

Параметрами  $h$ -го варианта имитационной модели (ИМ) является множество ресурсов предприятия:

$$X_h = (\{n_{1r1h}^0\}; \{n_{3r3h}^0\}; n_{5h}^0; n_{6h}^0),$$

где  $\{n_{1r1h}^0\}$  – общее число устройств оборудования индивидуального использования  $r_1$  типа;  $\{n_{3r3h}^0\}$  – общее число ресурсов индивидуального использования  $r_3$  типа;  $n_{5h}^0$  – число индивидуальных исполнителей  $n_{6h}^0$  – число бригад исполнителей.

Шаг 7. Анализ структуры  $h$ -го варианта организации ВПС (задача 1).

Определение вектора откликов, компонентами которого являются:  $Y_{1h} = T_{kph}$  – критическое время реализации  $h$ -го варианта организации ВПС;  $Y_{2h} = C_{\Sigma h}$  – суммарная стоимость реализации технологического цикла;  $Y_{3h} = mt_{\Sigma hr4}$  – суммарный расход материалов  $r_4$  типа;  $Y_{4h} = ko_{\Sigma hr5}$  – суммарный расход комплектующих деталей  $r_5$  типа;  $Y_{5h} = P_{BПh}$  – вероятность отказа оборудования в суточном цикле выполнения  $MTXO_{ij}$ .

Расчет эффективности варианта организации ВПС осуществляется на основе обобщенного критерия качества, который подлежит минимизации и имеет следующий вид:

$$\min_h L_h = \sum_{j=1}^5 \delta_{jh} \cdot Y_{jh}^*,$$

где  $0 \leq \delta_{jh} \leq 1$ ;  $\sum_{j=1}^5 \delta_{jh} = 1$  – весовые коэффициенты важности  $j$ -го отклика для лица, принимающего решение;  $Y_{jh}^*$  – значения  $j$ -х компонентов вектора откликов, нормированные максимальными значениями среди возможных вариантов организации ВПС.

Получаемые при этом интегральные графики изменения стоимости, расхода материалов и комплектующих изделий позволяют прогнозировать их потребности в процессе реализации технологического цикла ВПС.

Шаг 8. Поиск «узких мест» в организации ВПС (задача 2).

Для каждого  $h$ -го варианта ВПС по технологической схеме реализации формируется вероятностный сетевой график (ВСГР). Далее заменой технологических операций  $MTXO_{ij}$  на агрегаты технологических операций  $\{ATOP_{ij}\}$  имитационной модели и заменой событий ВСГР на соответствующие агрегаты-имитаторы событий  $\{ASOB_i\}$  формируется имитационная модель ВСГР. После  $N_M$  реализаций ИМ ВСГР формируется граф критических путей  $h$ -го варианта ВСГР ( $GRKRP_h$ ).

В общем случае с помощью  $GRKRP_h$  определяются:

- минимальное значение  $T^- = T_{kp \min h}$  с вероятностью  $P_{1h}$ ;
- максимальное значение  $T^+ = T_{kp \max h}$  с вероятностью  $P_{2h}$ ;
- наиболее вероятное значение  $T^* = T_{kph}$  с вероятностью  $P_{3h}$ .

Шаг 9. Определение минимального состава ( $\min X_h$ ) ресурсов (задача 3), при котором возможна реализация ВПС, осуществлялось на основе метода пошаговой реструктуризации имитационной модели ВСГР с учетом возможных вариантов реализации технологического цикла при наличии сбоев оборудования.

Шаг 10. Определение максимального состава ( $\max X_h$ ) ресурсов (задача 4), при котором отсутствует конкуренция  $MTXO_{ij}$  за ресурсы ВПС, осуществлялось методом пошаговой реструктуризации имитационной модели ВСГР с учетом сбоев оборудования.

Шаг 11. Выбор рационального состава ресурсов (задача 5) при наличии конкуренции  $MTXO_{ij}$  за ресурсы ВПС выполнялся на основе метода пошаговой реструктуризации имитационной модели ВСГР с учетом интенсивности сбоев оборудования.

Шаг 12. Сравнение вариантов организации ВПС (задача 6) осуществлялось на основе одноименного сравнения значений обобщенных откликов  $L_h$  имитационной модели и анализа требований к исходному и текущему составу ресурсов ВПС, надежности функционирования устройств оборудования. При этом установлено, что наличие конкуренции операций за оборудование и ликвидация последствий отказов оборудования увеличивает фактическое время и стоимость выполнения операций по отношению к запланированным величинам ( $\tau_{\Phi ij} > \tau_{ij}; S_{\Phi ij} > S_{ij}$ ).

### Обсуждение результатов

Опираясь на результаты апробации, необходимо отметить, что разработанный метод и программное обеспечение для исследования производственных систем с вероятностными характеристиками позволяют:

- обеспечить возможность повышения надежности производственных систем за счет построения рациональной структуры технологического цикла с учетом выбранного критерия качества его функционирования;
- снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций на производстве на основе выбранной рациональной структуры технологического цикла на стадии проектирования;
- обеспечить резервирование потенциально опасных технологических операций при проведении пуско-наладочных работ и монтажа технологических линий, имеющих определенный срок предварительной эксплуатации;
- снизить себестоимость работ при осуществлении проектирования новых производственных объектов;
- обеспечить возможность упреждения конфликтных ситуаций в функционировании технологического цикла производства.

Все вышеперечисленное в совокупности позволяет повысить уровень надежности и безопасности функционирования промышленных предприятий, а также конкурентоспособность выпускаемой ими продукции.

### Заключение

Таким образом, разработанные алгоритмы программ-имитаторов, которые реализованы в виде конечного набора элементов для моделирования компонентов технологического цикла, дают возможность оперативного построения имитационных моделей с привлечением специалистов конкретных предметных областей.

Полученные в процессе апробации практические оценки функционирования объектов исследования дают основания для обеспечения поддержки принятия управленческих решений при выполнении оценки надежности технологического цикла производства и оценке уровня безопасности функционирования предприятий. При этом предложенные библиотеки элементов имитационных моделей позволяют исследовать широкий класс исследуемых объектов ограниченным количеством основных компонентов модели, что дает возможность сократить время проектного моделирования на стадии разработки проекта и уменьшить стоимость проектного моделирования новых технологических объектов.

Данная разработка выполнялась в рамках следующих государственных программ научных исследований и тем, соответствующих приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь «Методы мониторинга окружающей среды, прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера», утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь 17 мая 2005 года № 512.

1. Государственной программы научных исследований «Научные основы и инструментальные средства информационных и космических технологий» (ГПНИ «Информатика и кос-

мос») в 2011 – 2012 годах (Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; рук. темы В.С. Смородин, ГР № 20111552; задание «Информатика и космос 1.3.06»).

2. Государственной комплексной программы научных исследований «Научные основы информационных технологий и систем» (ГКПНИ «Инфотех») в 2009 – 2010 годах (Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; рук. темы В.С. Смородин, ГР № 20090462; задание «Инфотех 54»).

3. Государственной программы прикладных научных исследований «Разработка и обоснование системы мер для снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Республике Беларусь» (ГППИ «Снижение рисков чрезвычайных ситуаций») в 2006 – 2008 годах (Гомельский инженерный ин-т МЧС РБ; рук. темы В.С. Смородин, ГР № 20061381; задание «СРЧС 16»).

4. Государственной комплексной программы научных исследований «Научные основы информационных технологий и систем» (ГКПНИ «Инфотех») в 2006 – 2008 годах (Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; рук. темы И.В. Максимей, ГР № 20061846; задание «Инфотех 44»).

5. Государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «Повышение надежности технических систем и обеспечение экологической безопасности территорий и населения в чрезвычайных ситуациях» (ГПОФИ «Надежность и безопасность») в 2004 – 2005 годах (Гомельский инженерный ин-т МЧС РБ; рук. темы В.С. Смородин, ГР № 20033706; задание «Надежность и безопасность 44»).

6. ХД 11-116 «Разработка алгоритмов функционирования динамических имитационных моделей вероятностных технологических систем» в 2011 – 2012 годах (Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; рук. темы В.С. Смородин).

При выполнении разработки использовалось стандартное программное обеспечение, а также специальное программное обеспечение, разработанное на кафедре математических проблем управления учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» в составе авторского коллектива.

## **APPLICATION OF DYNAMIC IMITATION FOR INCREASING OF EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF PROBABILISTIC PRODUCTIVE SYSTEMS**

A.V. KLIMENKO

### **Abstract**

A theoretical ground over and technology of application of dynamic simulation models are brought for the analysis of functioning of the probabilistic productive systems. Methodology of decision of tasks of project design of rational structure of technological cycle is offered at presence of elements potentially dangerous production.

### **Список литературы**

1. *Смородин В.С., Максимей И.В.* Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства. Гомель, 2007.
2. *Тамм Б.Г., Пуусепи М.Э., Таваст Р.Р.* Анализ и моделирование производственных систем. М., 1987.
3. *Смородин В.С.* // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). 2007. №1. С. 105–110.



УДК 681.3;007.003;007.008;65.0

## СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

В.С. СМОРОДИН

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины  
Советская, 104, Гомель, 246028, Беларусь*

*Поступила в редакцию 7 февраля 2012*

Предложен новый подход к унификации методов системных исследований в области проектного моделирования сложных систем с вероятностными параметрами их функционирования на основе конечного множества математических моделей. В качестве инструмента реализации предлагаемого подхода используется динамическое имитационное моделирование, базирующееся на разработке динамических имитационных моделей вероятностных производственных систем.

*Ключевые слова:* классы сложных систем, вероятностные производственные системы, динамические имитационные модели, синтез оптимальной структуры.

### Введение

В настоящее время накоплен большой опыт построения математических моделей объектов исследования из различных отраслей науки, техники, промышленности и экономики. Однако проявляющаяся последнее время тенденция к использованию общесистемных принципов и методов исследований [1] в различных областях знаний наталкивается на определенные трудности. Это связано, как известно, с целым комплексом различных причин: наличием больших объемов разнородной информации в различных областях знаний, использованием различных понятийных аппаратов, профессиональной разобщенностью исследователей и других.

Многочисленные попытки унификации системного подхода [2] при решении конкретных задач науки и практики привели к понятию сложной системы как многопараметрического объекта, представимого конечным множеством математических моделей, каждая из которых отражает конкретную группу свойств исходной системы. При этом появляется возможность выделить классы сложных систем со специфическими свойствами, на основании которых разрабатываются методологические принципы построения математических моделей, которые характеризуются единой математической терминологией и могут быть доступны специалистам различных предметных областей.

Такой подход дает основания рассчитывать в дальнейшем на создание необходимой базы, позволяющей исследователю работать с системами любой степени сложности, вне зависимости от ее физической сущности или ограниченности рамками определенной формализации. В тексте данной статьи к классам сложных систем относятся производственные и экономические системы, вычислительные сети, системы управления, системы энергообеспечения, а также другие системы, призванные обеспечивать безопасность жизнедеятельности и производства.

Системный анализ сложных систем положен в основу исследований производственных систем с вероятностными характеристиками их функционирования (вероятностных производственных систем) как класса сложных систем. При этом под вероятностными характеристиками функционирования могут пониматься характеристики надежности функционирования оборудования, задействованного в ходе реализации технологического цикла производства, харак-

теристики выполнения технологических операций, качественные характеристики используемых в процессе производства материалов и комплектующих изделий и другие.

В качестве инструмента для реализации предлагаемого подхода используется динамическое имитационное моделирование, базирующееся на разработке динамических имитационных моделей.

### Краткий анализ состояния вопроса

Как показал анализ современного состояния разработок в области исследования и проектирования технологических объектов с вероятностными характеристиками их функционирования [3], проблема моделирования вероятностных производственных систем состоит в недостаточной результативности методов их исследования при увеличении количества учитываемых параметров, в особенности для тех случаев, когда структура технологического цикла изменяется в процессе функционирования объекта исследования.

Это связано, в первую очередь, с многообразием сложных технологических систем, в ходе реализации которых могут изменяться параметры их функционирования и структура технологического цикла; сложностью практических задач при оценке уровня надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов; необходимостью учета человеческого фактора при выполнении работ на потенциально опасных объектах.

В соответствии с вышесказанным является актуальной задача обеспечения надежности и безопасности функционирования производственных систем, а также повышение эффективности их использования. Одним из подходов на пути решения данной проблемы является проектное моделирование рациональной структуры вероятностных производственных систем как на стадии проектирования новых, так и при эксплуатации существующих технологических линий.

Поэтому разработка новых методов, программных средств анализа и синтеза оптимальной структуры наиболее сложных вероятностных технологических процессов, использующихся при организации работ на ответственных объектах при наличии оборудования, которое может отказывать и служить источником возникновения аварий техногенного характера, являются весьма актуальными с научной и практической точек зрения.

### Методика построения компонентов динамической имитационной модели вероятностной производственной системы

Для построения компонентов динамической имитационной модели вероятностных производственных систем использовалась агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства, реализующая агрегатный способ имитации сложных систем, а также способ формализации вероятностных производственных систем на основе вероятностных сетевых графиков (ВСГР) [4]. При этом используется шесть типов агрегатов-имитаторов:

$АТОР_{ij}$  – агрегат-имитатор выполнения технологической операции ( $МТХO_{ij}$ );

$АSOB_i$  – агрегат-имитатор свершения  $i$ -го события в процессе имитации функционирования вероятностной производственной системы (ВПС);

$АOBIN_r$  – агрегат-имитатор функционирования оборудования индивидуального пользования с номером  $r$ ;

$АKAN_r$  и  $АОВОР_r$  – агрегат-имитатор совместного использования оборудования общего пользования с помощью выделенного канала;

$АPROC_k$  – процедура-имитатор с номером  $k$  ликвидации аварийной ситуации при выполнении имитационной модели (ИМ) ВПС.

Каждый из этих агрегатов представляет собой реентерабельную программу из конечного множества математических моделей, составляющих математическую модель исходной вероятностной производственной системы. Упомянутые модели агрегатов-имитаторов в базе данных модели имеют свой набор переменных и статистик моделирования в соответствии с версией модели. Количество версий равно числу агрегатов данного типа в ИМ ВПС. Динамика реализации алгоритмов этих агрегатов одинакова для каждого типа агрегатов, но каждая из версий

может находиться в различных состояниях, согласно временной диаграмме реализации агрегатов в модельном времени. Рассмотрим кратко динамику реализации алгоритма одной из версий этих агрегатов.

$AMTXO_{ij}$  представляет собой четырехполюсный агрегат, имитирующий выполнение технологической операции  $MTXO_{ij}$  в ИМ ВПС. В режиме прямой имитации приходит сигнал от  $ASOB_i$ , который по соответствующим функциям распределения формирует значения параметров агрегата ( $\tau_{ijl}$ ;  $c_{ijl}$ ;  $\{V_{rij}\}$ ;  $\{mt_{ijl}\}$ ;  $\{ko_{ijl}\}$ ) в  $l$ -ой реализации ИМ. Затем каждый  $ATOP_{ij}$  определяет индивидуальные запросы на ресурсы и оборудование в виде списков запросов ( $SPINRS_{ijl}$ ;  $SPOBR_{ijl}$ ;  $SPISP_{ijl}$ ). Далее происходит обращение к системе распределения ресурсов, которая выделяет требуемые ресурсы на время имитации  $MTXO_{ij}$ . Когда при имитации  $ATOP_{ij}$  на выделенном ему оборудовании возникают опасные отказы, то интервал времени выполнения  $ATOP_{ij}$  будет увеличиваться до тех пор, пока не будут завершены восстановительные работы на соответствующем агрегате-имитаторе оборудования. При этом проводится анализ возможных последствий случившегося опасного отказа оборудования путем розыгрыша с вероятностью  $P_{ar}$  жребия первого типа «произошла авария», который позволяет идентифицировать наличие аварии при работе агрегата на оборудовании с номером  $r$ . Если возникла сложная авария, то для ее ликвидации используется «штатная» последовательность процедур ликвидации аварий (агрегатов-имитаторов)  $\{APROC_k\}$ . Каждый из них обладает своим оборудованием, составом исполнителей и действует по утвержденному алгоритму ликвидации последствий аварийной ситуации. Длительность  $\tau_{prkl}$  реализации  $APROC_k$  также является случайной величиной и формируется по известной до начала имитации функции распределения  $\Phi_{4k}(\tau_{pr})$ . По окончании реализации этой последовательности агрегатов выполнение операции на отказавшем оборудовании продолжается с прерванного места, формируется признак «была авария» ( $\pi_{ak} = 1$ ), а время выполнения операции на оборудовании увеличивается на величину, равную суммарному времени выполнения всех процедур  $APROC_k$ . По окончании имитации последовательности  $\{APROC_k\}$  инициируется возврат на  $ATOP_{ij}$ , где и формируется сигнал, поступающий на  $r$ -й вход агрегата  $ASOB_j$ . При этом передается признак  $\pi_{ak} = 1$  («была авария» на оборудовании номера  $k$ ), а агрегат  $ATOP_{ij}$  переходит в режим ожидания инверсного сигнала от  $ASOB_j$ .

Агрегаты  $ASOB_i$  являются многополюсными с различным числом входов и выходов. Выходы у  $ASOB_i$  могут быть одиночными и «кустовыми». Из «кустовых» выходов агрегата формируются сигналы двух типов: действительный  $Sg_d$ , разыгрываемый по вектору вероятностей  $\{P_{ijkl}\}$  и  $(k-1)$  фиктивных сигналов  $Sg_f$ . Выходы  $ASOB_i$  нумеруются, поэтому при адресации сигнала указывается номер события  $i$  и номер входа  $r$  в агрегат  $ASOB_j$ . Только действительные сигналы  $Sg_d$ , поступающие в режиме прямой имитации на вход  $ATOP_{ij}$ , инициируют его работу по изложенному алгоритму. Фиктивные сигналы  $Sg_f$  обходят алгоритм выполнения  $ATOP_{ij}$ . При этом у агрегатов  $ASOB_j$  используется еще один тип выходных «кустовых» сигналов, называемых резервными выходами  $ASOB_j$ . С их помощью реализуется «технологическое резервирование» в ИМ ВПС. При появлении отказов оборудования во время выполнения  $ATOP_{ij}$ , которые посылают сигналы на входы  $ASOB_j$ , внутри сигнала устанавливается признак аварии ( $\pi_{ав}$ ). Если  $\pi_{ав} = 1$  (это означает, что  $ASOB_j$  инициируется в ситуации, когда на предыдущем  $ATOP_{ij}$  была авария), то в этих случаях инициируются «резервные» вы-

ходы. С этих выходов может формироваться любая комбинация сигналов  $Sg_d$  и  $Sg_f$ . Если  $\pi_{ав} = 0$  на всех входах  $ASOB_j$ , то это означает, что аварий до активизации агрегата не было, поэтому активизируются «штатные»  $АТОР_{js}$ .

Если хотя бы на один из входов  $ASOB_j$  приходят сигналы от  $АТОР_{ij}$ , во время выполнения которых была авария, то это означает активизацию резервного кустового выхода. Механизм формирования действительных сигналов у «кустовых» выходов третьего типа основан на использовании булевой матрицы  $\|\gamma_{nr}\|$ , которую составляет технолог-эксперт до начала имитации. Наличие единицы на пересечении  $n$ -й строки с  $r$ -м столбцом в этой матрице означает необходимость включения резервных  $АТОР_{jr}$  в том случае, когда во время выполнения  $АТОР_{nj}$  произошла авария ( $\pi_{авн} = 1$ ). С помощью этого механизма кустовые выходы третьего типа становятся динамическими регуляторами подключения резервных  $АТОР_{jr}$ , если на входы  $ASOB_j$  поступают сигналы от  $АТОР_{ij}$ , во время выполнения которых на оборудовании, используемом ими, происходили аварии.

Имитация функций оборудования инициируется запусками  $АТОР_{ij}$ , который может использовать любое число имитаторов оборудования. За каждым  $АТОР_{ij}$  закрепляется два типа оборудования: индивидуального пользования с номером  $r$ , имитируемого агрегатами  $АОВИ_{nr}$ ; общего пользования, имитируемого агрегатами  $АОВОР_r$ . На агрегатах оборудования общего пользования  $АТОР_{ij}$  использует некоторый объем общего ресурса  $V_{r2ij}$  на время его имитации. По окончании имитации занятый объем ресурса возвращается агрегату оборудования общего пользования  $АОВОР_r$ . Поскольку общим оборудованием могут пользоваться несколько  $АТОР_{ij}$ , то синхронизация их доступа реализуется следующим образом: работа оборудования общего пользования имитируется одним агрегатом  $АОВОР_r$  и множеством агрегатов-имитаторов каналов общего пользования  $АКАН_r$ , число которых равно числу агрегатов  $АТОР_{ij}$ , использующих совместно ресурсы  $АОВОР_r$ . Агрегат  $АОВОР_r$  функционирует непрерывно (последовательно переходит из состояния  $S_1$  в состояние  $S_2$ , а затем снова в состояние  $S_1$ ) в течении  $l$ -й реализации ИМ ВПС. Длительность нахождения оборудования в этих состояниях определяется при их смене соответственно функциям распределения:  $k$ -й интервал безотказного функционирования  $\tau_{бокl}$  находится по функции распределения  $\Phi_{1r}(\tau_{бо})$ , определяя длительность нахождения общего оборудования в состоянии  $S_1$ ;  $k$ -й интервал восстановления работоспособности оборудования  $\tau_{бокl}$  также находится по функции распределения  $\Phi_{2r}(\tau_{бо})$ , определяя таким образом длительность нахождения общего оборудования в состоянии  $S_2$ . Это чередование состояний агрегата продолжается до окончания  $l$ -й реализации ИМ. Далее весь процесс имитации  $АОВОР_r$  продолжается аналогичным образом, но уже в  $(l+1)$ -й реализации имитационной модели.

Поскольку  $АТОР_{ij}$  и  $АОВОР_r$  функционируют независимо, каждый согласно своим алгоритмам, то для синхронизации совместного использования несколькими  $АТОР_{ij}$  одного и того же  $АОВОР_r$  (когда он находится именно в состоянии  $S_1$ ) введено использование агрегата-канала  $АКАН_r$ , имитирующего использование общего ресурса  $V_{rjl}$ . Количество таких  $АКАН_r$  определяется числом использований  $АОВОР_r$  всеми агрегатами  $АТОР_{ij}$ .

Таким образом, с помощью комбинаций различных типов кустовых выходов и задания числа разветвлений каждого кустового выхода, эксперту-технологу на стадии проектирования

предоставляется возможность динамического регулирования выполнения множества  $\{ATOP_{ij}\}$  в зависимости от сложившейся операционной обстановки.

### Синтез динамической структуры технологического цикла на имитационной модели вероятностной производственной системы

Как видно из методики построения компонентов динамической имитационной модели, исходная вероятностная производственная система представляется в виде конечного набора взаимосвязанных математических моделей. Связь между компонентами математической модели исходной ВПС осуществляется посредством синхронизации взаимодействия агрегатов-имитаторов, входящих в состав моделей-компонентов.

На основании значений множества  $\{\pi_{авij}\}$ , агрегат события  $ASOB_j$  осуществляет технологическое резервирование по изложенной выше методике. Кроме технологического резервирования, в ИМ ВПС предусмотрено автоматическое индивидуальное резервирование оборудования, которое включается при достижении фактической наработки оборудования его критического значения. До начала имитации эксперт-технолог устанавливает для каждого устройства порог  $Q_{0r}$  этой наработки. Фактическая наработка  $Q_{\Phi r}$  накапливается на индикаторе  $Ind_r$  путем добавления к значению этого индикатора при каждом использовании устройства некоторого приращения  $\Delta Q_{\Phi r}$ . С интервалом  $\Delta t_{\Gamma}$  значения этих индикаторов посылаются системе принятия решений  $SPRESH$  для обеспечения оперативного управления процессом имитации.

Окончательный вариант организации рациональной структуры технологического цикла, который соответствует текущему состоянию оборудования, принимается на основе анализа статистической информации, собранной в процессе функционирования имитационной модели.

Важной статистикой реализации ВСГР, лежащего в основе формализации вероятностной производственной системы, является граф критических путей ( $GR\_KRP_h$ ) в  $N$  реализациях  $h$ -го варианта ВПС, который получен следующим образом. Каждый элемент  $l$ -й реализации ВСГР критический путь  $KRP_{lh}$  представляет собой последовательность чередования статистик выполнения агрегатов ( $ASOB_i, ATOP_{ij}, ASOB_j$ ). При этом статистиками выполнения  $ASOB_i$  являются четверки значений  $(i, t_{pil}, t_{nil}, R_{il} = 0)$ , а статистиками  $ATOP_{ij}$  служат тройки значений  $(ij, \tau_{vijl}, c_{ijl})$ . Используя исходную структуру ВСГР, эти последовательности накладываются, а в итоге формируется вероятностный граф критических путей  $GR\_KRP_h$ . На выходе  $ASOB_i$  подсчитывается количество запусков  $ATOP_{ij}$  ( $v_{ij}$ ) во всех  $N$  реализациях исходного ВСГР. Затем происходит формирование вероятностей  $P_{ij}$  запусков  $ATOP_{ij}$  с выходов  $ASOB_i$  графа  $GR\_KRP_h$ . Таким образом, кроме четверки статистик  $ASOB_i$   $(i, \bar{t}_{pi}, \bar{t}_{ni}, \bar{R}_i)$ , на каждом выходе этого агрегата формируется вектор  $\{P_{ks}\}$  вероятностей запусков  $ATOP_{ij}$ , где  $s$  – номера компонентов этого вектора вероятностей.

Другой группой статистик  $\{ST_{hl}\}$  являются графики расхода ресурсов в модельном времени при  $l$ -й реализации ИМ ВСГР: ресурсов ( $GR_{1rl}$ ) с номером  $r$ , материалов и комплектующих изделий ( $GR_{2rl}$ ) с номером  $r$ , суммарного расхода финансовых средств ( $GR_{3l}$ ). Фиксируются также временные диаграммы использования: оборудования ( $DIAG_{1l}$ ), исполнителей ( $DIAG_{2l}$ ), бригад исполнителей ( $DIAG_{3l}$ ).

Таким образом, в конце  $l$ -й реализации имитационной модели ВПС множество статистик  $\{ST_{hl}\}$  включает в себя следующие графики и диаграммы:  $\{GR_{1rl}\}, \{GR_{2rl}\}, \{GR_{3l}\}, \{DIAG_{1l}\}, \{DIAG_{2l}\}, \{DIAG_{3l}\}$ . Эти статистики запоминаются в виде файлов графиков и диаграмм в базе данных имитационной модели и, по решению эксперта-технолога, могут направляться в систему принятия решений ( $SPRESH$ ) для выполнения анализа в цикле каждой  $l$ -й реализации имитационной модели. По завершении реализаций ИМ графики и диаграммы (в

модельном времени  $t_0$ ) накладываются друг на друга системой *SPRESH* и в виде набора параметров ( $\theta_6$ ) передаются эксперту для выбора окончательного варианта структуры ВПС.

### Обсуждение результатов

Новизна класса формализуемых систем производственных систем состоит в том, что в процессе функционирования технологического цикла может произойти изменение его структуры в результате управляющих воздействий аппаратуры управления или оператора технологического цикла вследствие сбоев или отказов функционирования задействованного оборудования. При этом предложенный подход позволяет решать следующие задачи:

- проектного моделирования надежных и безопасных производственных систем с учетом операций резервирования и ликвидации последствий сбоев и аварий оборудования;
- синтеза оптимальной структуры технологического цикла с учетом надежностных характеристик используемого оборудования на стадии проектирования;
- обеспечения динамической имитации класса производственных систем с вероятностными параметрами их функционирования на стадии проектного моделирования с использованием конечного множества математических моделей.

Все вышеперечисленное в совокупности дает возможность ускорения разработки новых проектов технологических комплексов и снижения себестоимости проектирования их оптимальной структуры при наличии элементов потенциальной опасности.

### Заключение

Разработанный подход и программное обеспечение проектного моделирования производственных систем с вероятностными характеристиками позволяют: повысить надежность и безопасность производства существующих технологических систем за счет резервирования цепочек технологических операций при возникновении аварийной ситуации; снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций на производстве, на основе построения рациональной структуры технологического цикла на стадии проектирования; обеспечить резервирование потенциально опасных технологических операций при проведении пуско-наладочных работ и монтаж технологических линий, имеющих определенный срок предварительной эксплуатации.

## SYNTHESIS OF DYNAMIC STRUCTURE FOR PROBABILISTIC PRODUCTIVE SYSTEMS

V.S. SMORODIN

### Abstract

The new direction is offered near the unitization of methods of system researches in area of project design of the difficult systems with the probabilistic parameters of their functioning on the basis of finite set of mathematical models. As an instrument of realization offered approach a dynamic imitation design being based on development of dynamic simulation models of the probabilistic productive systems is used.

### Список литературы

1. Бусленко Н.П. Лекции по теории больших систем. М., 1973.
2. Клир Дж. Системология. М., 1990.
3. Смородин В.С. // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). 2007. №1. С. 105–110.
4. Смородин В.С. // Проблемы управления и информатики. 2006. №5. С. 79–91.

УДК 534.8: 621.396.6

## ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В.С. ТОМАЛЬ

РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника»  
Филимонова, 25, Минск, 220114, Беларусь

Поступила в редакцию 24 января 2012

Для повышения эффективности ультразвуковой очистки в ваннах с распределенными преобразователями необходимо обеспечить оптимальное кавитационное давление, концентрацию ПАВ, температурные режимы в моющих средах, а также величину ультразвукового давления.

*Ключевые слова:* очистка, технология, ванны, ультразвук.

### Проблемы очистки электронно-оптических изделий

Высокое качество электронно-оптических изделий во многом определяет качество того оборудования, в котором они используются – электронных систем, медицинской аппаратуры, кино-фотоаппаратуры и контрольно-измерительных комплексов. В самих приборах большое значение имеет чистота поверхности отдельных деталей и узлов. При любой точности обработки минимальное количество посторонних веществ на оптических поверхностях не позволяет получить требуемые оптические характеристики, что ведет к увеличению брака, отказам приборов и аппаратуры в процессе эксплуатации, увеличению вероятности получения недостоверных данных [1].

Очистка электронных изделий после пайки – заключительная операция, ответственная за полную удаленность всех загрязнений, сопровождающих производство печатных плат, хранение, сборку и пайку. Поэтому очистка должна удалять загрязнения всех типов: очистки солей электролитов, травящих растворов, флюсов, активаторов флюсов, жировые отпечатки пальцев, пыль, абразивные частицы. Некачественная очистка изделий при их эксплуатации или хранении приводит к снижению сопротивления изоляции, физическому разрушению проводников в результате коррозии, сами продукты коррозии могут привести к утечке тока, нарушению влагозащитного покрытия и т.д. [2]. Все это приводит к снижению показателей надежности изделий.

При поверхностном монтаже компонентов, когда, с одной стороны, повышается плотность размещения компонентов, контактных площадок, печатных проводников, а с другой – критическими становятся проблемы влияния остаточных флюсов, коррозии проводников, брака изоляции, повышаются требования к чистоте поверхности изделий, поэтому операции их очистки после пайки усложняются [3].

Для возбуждения УЗ-колебаний в ваннах очистки используют различное число пакетных пьезоэлектрических преобразователей мощностью (50–100 Вт), закрепленных на боковых стенках и дне ванны в определенном порядке, с параллельным их подключением к генератору [4]. В этом случае эффективность и устойчивость работы преобразователей зависит от ширины рабочей полосы частот, что позволяет перекрывать амплитудно-частотные характеристики отдельных преобразователей и компенсировать неизбежный разброс их собственных резонансных частот.

Развитие технологии УЗ-очистки за последние десятилетия показало, что наиболее производительным является групповой способ обработки мелких изделий, уложенных в кассеты или корзины в УЗ-ваннах. Воздействие УЗ-полей на жидкие среды вызывает в них процессы кавитации, а также макро- и микропотоки в объеме жидкости, прилегающей к излучаемой поверхности ванны. Захлопывание кавитационных газовых полостей сопровождается образованием ударных микроволн, давления в которых могут достигать  $(1-5) \cdot 10^8$  Па. Такие микроудары разрушают не только оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности изделий, но и в определенной степени изменяют морфологию поверхности. Возникающие микро- и макропотоки способствуют удалению загрязнений и ускорению процесса очистки микрорельефной поверхности. Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты, возникновение микро- и макропотоков, определяют интенсификацию процесса удаления загрязнений со сложно профилированных поверхностей изделий под действием УЗ-поля [5].

Таким образом, одной из главных проблем при УЗ-очистке электронных и оптических изделий в УЗ-технологических системах с распределенными преобразователями, является получение равномерной кавитационной области в технологическом объеме УЗ-ванны.

### Моделирование ультразвукового давления в ваннах очистки

Влияние ультразвука на процесс очистки основано, главным образом, на действии переменных давлений, возникающих в жидкой среде при воздействии УЗК, а также кавитационных процессов в жидкой среде. В том случае, если источником колебаний служит плоский источник, распределение переменных давлений и скоростей в ванне зависит от трех координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) и имеет весьма сложный характер. При работе плоского источника колебаний, встроенного в дно ванны, в колебаниях принимают участие и стенки: следовательно, прилегающие слои жидкости колеблются не только в вертикальной, но и горизонтальной плоскости. Кроме того, у стенок ванн всегда имеется градиент скоростей, так как слои жидкости вследствие трения о твердые тела движутся с меньшими скоростями.

Считая стенки достаточно массивными и пренебрегая их колебаниями, а также градиентом скоростей, для середины достаточно большой ванны можно принять ультразвуковое поле плоскопараллельным при относительно малых удельных интенсивностях. Необходимо также учитывать искажение плоскопараллельного поля вследствие кавитации. Математические трудности, связанные с изучением УЗ-поля при кавитации, до настоящего времени еще не преодолены, поэтому представляется возможным только приближенное математическое решение задачи.

Распространение УЗ-волн в среде описывается волновым уравнением [6]:

$$\frac{1}{\rho_0 c_w^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – плотность жидкой среды;  $p$  – давление;  $c_w$  – скорость распространения звуковых волн в среде;  $t$  – время;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – декартовы координаты.

Для решения волнового уравнения задавались следующие граничные условия:

- на границах ванны:

$$n \cdot \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right) = 0. \quad (2)$$

- на ультразвуковых излучателях, обозначенных литерой  $A$  (рис. 1):

$$P_A = p_0 \sin(\omega t) + p_0 \sin([\omega - 100]t) + p_0 \sin([\omega + 100]t);$$

- на ультразвуковых излучателях, обозначенных литерой  $B$ :

$$P_B = p_0 \sin(\omega t + 4/6 \pi) + p_0 \sin([\omega - 100]t + 4/6 \pi) + p_0 \sin([\omega + 100]t + 4/6 \pi);$$

- на ультразвуковых излучателях, обозначенных литерой  $C$ :



$$P_B = p_0 \sin(\omega t + 2/6 \pi) + p_0 \sin([\omega - 100]t + 2/6 \pi) + p_0 \sin([\omega + 100]t + 2/6 \pi).$$

В начальный момент времени полагалось равенство давления нулю давления жидкости:  $p(x, y, z) = 0$ . Задавая граничные условия для системы излучателей  $A$ ,  $B$  и  $C$ , расположенных на дне ванны, получена объемная картина распределения УЗ-давления в ванне.

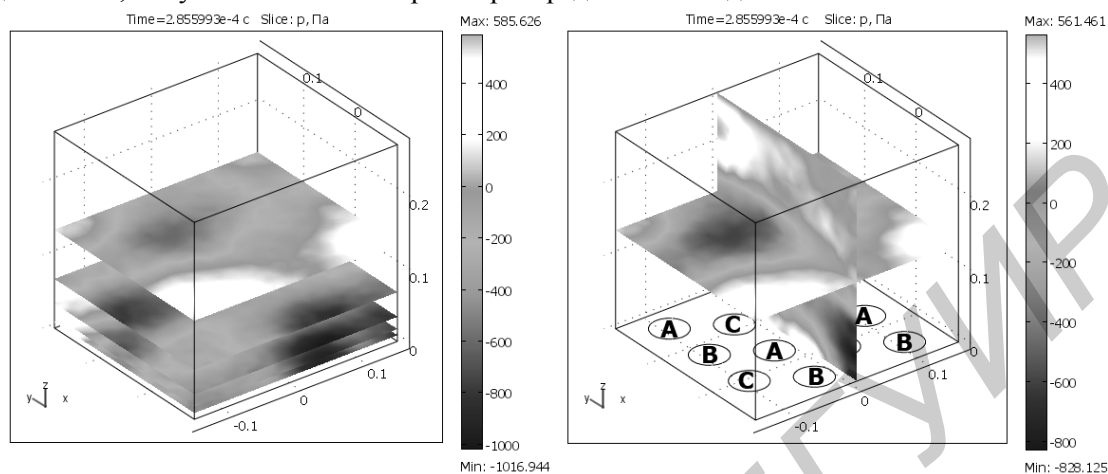


Рис. 1. Распределения УЗ давления в плоскостях и объеме ванны

В результате моделирования определены области наибольшего акустического давления, расположенные на расстояниях от плоскости излучения, кратных  $n\lambda/4$ , где возникают вихревые макро- и микропотоки (шлифтинговского или рэлеевского типа), которые интенсифицируют процессы массопереноса и растворения загрязнений.

### Исследования равномерности ультразвукового поля в ваннах

Качество ультразвуковой очистки электронно-оптических деталей в значительной степени зависит от величины кавитационного давления и равномерности его распределения в рабочем объеме моющей среды, которые, в свою очередь, зависят от выбора технологических режимов. Величина кавитационного давления измерялась с помощью прибора, принцип действия которого основан на измерении спектра мощности кавитационного шума [4]. В качестве показателя неравномерности кавитационного поля использовалось среднее квадратическое отклонение кавитационного давления по площади (глубине), в зависимости от показателя в центре ванны, выраженное в процентах.

На рис. 2,а представлена зависимость неравномерности распределения кавитационного давления по площади ванн от расстояния до дна и числа работающих пьезокерамических преобразователей ПП (кривая 1 – 12 ПП, кривая 2 – 10 ПП, кривая 3 – 8 ПП, кривая 4 – 6 ПП, кривая 5 – 4ПП). С удалением от излучающей поверхности (дна ванны) равномерность распределения кавитационного давления повышается и достигает максимального значения в центральной области ванны. Высокая неравномерность распределения кавитационного давления в непосредственной близости от излучающей поверхности объясняется неравномерностью распределения звукового давления в ближнем поле. Поскольку преобразователи возбуждаются амплитудно-модулированным сигналом с синусоидальной модуляцией, спектр излучаемых колебаний содержит три частоты:  $\omega$ ,  $\omega + \Omega$  и  $\omega - \Omega$ , где  $\omega$  – частота УЗ-колебаний (44 кГц), а  $\Omega$  – частота модуляции (100 Гц). В результате сложения этих волн с отраженными от стенок и поверхности жидкости волнами, возникает сложная интерференционная картина. С увеличением количества работающих преобразователей неравномерность распределения звукового давления растет. Однако благодаря тому, что прямые и отраженные амплитудно-модулированные волны обладают малой степенью когерентности, отсутствуют области с максимальным и минимальным давлением, что позволяет получить высокую равномерность воздействия УЗ-колебаний на очищаемое изделие в центре ванны. Учитывая такой характер распределения кавитационного давления, очищаемые изделия необходимо располагать на расстоянии не ближе  $1,5-2,0 \lambda$  от дна ванны. Для частоты 44 кГц это расстояние составляет 50–70 мм.

В водных растворах с поверхностно активными веществами (ПАВ) с содержанием до 1,2 % (рис. 2,б) кавитационное давление ниже, так как ПАВ уменьшают силу поверхностного натяжения, что приводит к снижению порога кавитации и уменьшению скорости захлопывания кавитационных пузырьков, и, следовательно, к снижению микроударного действия кавитации.

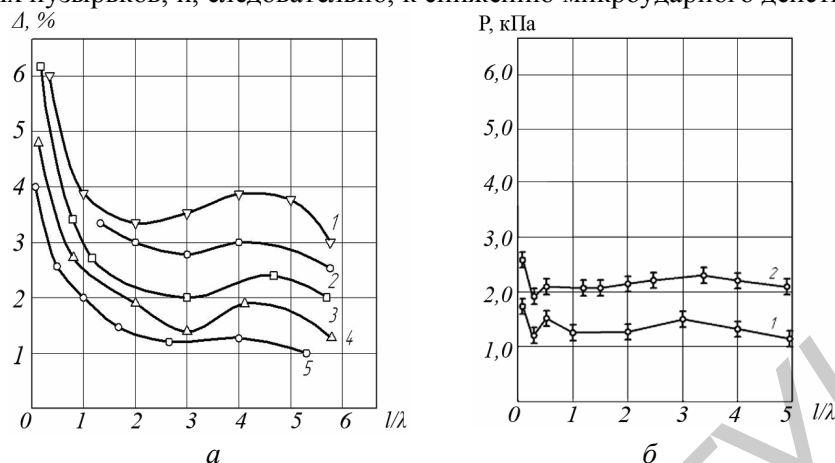


Рис. 2. Зависимость неравномерности распределения кавитационного давления по площади ванн (а) от соотношения расстояния до дна к длине волны: 1 – 12 ПП, 2 – 10 ПП, 3 – 8 ПП, 4 – 6 ПП, 5 – 4 ПП и по глубине (б): 1 – в ванне с ПАВ, 2 – в ванне с дистиллированной водой

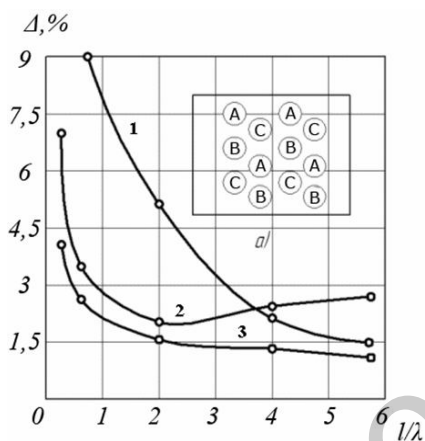


Рис. 3. Топология расположения УЗ-преобразователей на дне ванны и неравномерность распределения кавитационного давления по площади ванны в зависимости от расстояния до дна и количества работающих преобразователей: 1 – преобразователи каналов А, В, С, 2 – преобразователи каналов А, В, 3 – преобразователи канала А

Аналогичный характер изменения кавитационного давления по глубине наблюдается и в других ваннах аналогичной конструкции. На рис. 3,а приведена схема расположения УЗ преобразователей на дне ванны, а на рис. 3,б – зависимость неравномерности распределения кавитационного давления по площади ванны от расстояния до ее дна и количества работающих преобразователей. Обозначения внутри кружков А, В, С соответствуют каналам УЗ-генератора, к выходу которого подключены преобразователи. По мере приближения к поверхности моющей среды неравномерность распределения кавитационного давления по площади ванны уменьшается. Неравномерность распределения кавитационного давления по глубине составляет 5,4%.

При отключении канала С кавитационное давление УЗ-генератора уменьшается всего на 2 дБ, однако резко возрастает неравномерность его распределения (кривая 2 рис. 3,б), как по площади, так и по глубине. Неравномерность распределения кавитационного давления по глубине увеличивается до 13,4%. Увеличение неравномерности распределения кавитационного давления в объеме моющей среды объясняется, во-первых, смещением геометрического центра излучения преобразователей по отношению к геометрическому центру ванны, во-вторых – нарушением симметрии фазового сдвига между выходными сигналами каналов УЗ-генератора. При отключении каналов В и С уровень кавитационного давления УЗ-генератора уменьшается на 7 дБ, а неравномерность его распределения по площади уменьшается по сравнению с предыдущим случаем (кривая 3) и составляет 11,4%. Повышение равномерности распределения кавитационного давления по площади ванны объясняется восстановлением геометрической симметрии в расположении работающих преобразователей, а также восстановлением синфазности излучаемого сигнала, т.к. в этом случае все четыре работающих преобразователя подключены к выходу одного канала генератора. Таким образом, отключение отдельных групп преобразователей может привести к существенному нарушению равномерности кавитационного давления в объеме моющей среды и к снижению качества очистки.

Зависимость распределения кавитационного давления по глубине обусловлена нелинейным характером распределения интенсивных УЗ-волн. В непосредственной близости от излучающей поверхности ( $0 < l < \lambda/4$ ) превалирует процесс поглощения энергии интенсивной звуковой волны вследствие необратимых процессов, обусловленных вязкостью и теплопроводностью среды, за счет конструктивного расположения нагревателей в нижней части ванны. Однако, по мере распространения интенсивной УЗ-волны, искажается ее форма, что приводит к расширению ее спектрального состава и увеличению амплитуды высокочастотных составляющих спектра, что обуславливает увеличение кавитационного давления в области  $l > \lambda/4$ .

Сложным образом на качество ультразвуковой очистки оптических деталей влияет температура, так как она оказывает влияние как на акустические эффекты, так и на процессы растворения. Влияние температуры на величину кавитационного давления и равномерность его распределения в объеме моющей среды исследовалось в ваннах, заполненных различными моющими средами. На рис. 4 приведены зависимости кавитационного давления от температуры среды и ее вида.

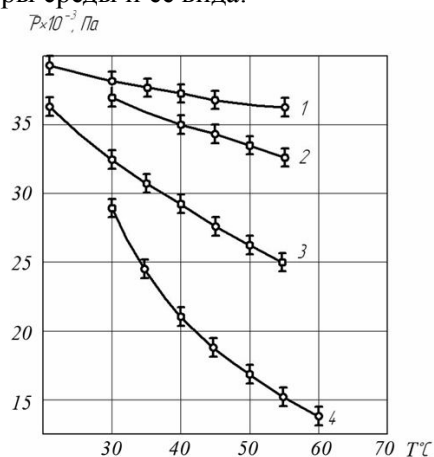


Рис. 4. Зависимости кавитационного давления от температуры моющей среды и ее вида: 1 – в ванне с водопроводной водой, 2 – в ванне с деионизованной водой, 3 – в ванне с раствором ПАВ с концентрацией 1,5%, 4 – в ванне с раствором ПАВ с концентрацией 3%

устанавливать такие температурные режимы, при которых эффективность воздействия ультразвуковых колебаний и эффективность ПАВ будут оптимальными. При ультразвуковой очистке оптических деталей оптимальная температура моющих сред на основе водных растворов ПАВ лежит в пределах 30–50°.

### Заключение

В результате исследований влияния технологических режимов на величину кавитационного давления и неравномерность его распределения в объеме моющей среды установлено, что наилучшая зона расположения очищаемых деталей находится на расстоянии  $1,5\lambda-4\lambda$  от излучающей поверхности, оптимальная температура в растворах ПАВ составляет 30–50°С, величина кавитационного давления меньше чем в чистой воде, а равномерность его очистки обеспечивает высокую равномерность воздействия УЗ-колебаний на очищаемые изделия и, следовательно, высокое качество очистки.

# THE CHOICE OF OPERATING PRACTICES OF ULTRASONIC CLEANING OF ELECTRON-OPTICAL PRODUCTS

V.S. TOMAL

## Abstract

In order to increase the efficiency of ultrasonic clearing in baths with the distributed converters, there should be provided optimal cavitation pressure, concentration surface acoustic wave (SAW), temperature conditions in detergent environments and the value of ultrasonic pressure.

## Список литературы

1. Касинский Н.К., Лысянный Ю.К., Томаль В.С. // Техника. Экономика. Организация. 2001. №4. С. 2–4.
2. Savage T. // Wire Industry. 2005. №6. P. 424–426.
3. Ларин В.П., Лучкова Л.В. // Приборы и системы управления. 1991. №8. С. 43–44.
4. Кундас С.П., Ланин В.Л., Тявловский М.Д. и др. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Минск, 2003.
5. Томаль В.С. // Доклады БГУИР. 2007. №1. С. 40–45.
6. Morse P.M., Ingard K.U. Theoretical Acoustics, Princeton Univ. Press, 1986.

УДК 621.385

**ДВУХВОЛНОВОЙ ГИРОТРОН НА МОДАХ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ**

С.В. КОЛОСОВ, А.А. КУРАЕВ, А.В. СЕНЬКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 27 сентября 2011*

Рассмотрены возможности повышения эффективности работы миллиметрового гиротрона при многомодовом взаимодействии полей волн шепчущей галереи с релятивистским спиральным электронным потоком. Показано, что двухмодовый гиротрон по сравнению с одномодовым позволяет повысить КПД с 40 до 45%.

*Ключевые слова:* гиротрон, нерегулярный волновод, многомодовый режим.

**Введение**

Оптимальным распределением ВЧ-поля по длине резонатора гиротрона является нарастающее к концу резонатора поле [1], т.е. фазовая группировка пучка электронов должна проводиться в слабом нарастающем поле, а отбор энергии в сильном поле быстро спадающим в конце резонатора.

Реально при больших азимутальных и радиальных индексах волновых мод в волноводе реализовать такое распределение в одномодовом режиме невозможно даже в нерегулярном волноводе. Но если использовать резонатор, состоящий из секций с разными типами волн, то можно добиться того, что амплитуды волн от секции к секции будут нарастать и это приведет к повышению общего КПД прибора. При этом в каждой из секций распределение амплитуды волны будет близко к синусоидальному.

**Результаты моделирования**

Для расчетов использовалась программа *Gyro-K* из программного комплекса КЕДР [2]. Математическая модель процессов в гиротроне, заложенная в этой программе, основана на теории возбуждения нерегулярного волновода релятивистским электронным потоком с учетом омических потерь в стенках волновода [3].

В качестве прототипа был выбран гиротрон, рассмотренный в [4]. Этот гиротрон работал на моде  $TE_{22,6}$  с напряжением электронного пучка 96 кВ, током 40 А на частоте 110 ГГц и пинч-фактором  $q = V_{\perp}/V_z = 1,4$ . Начальный угловой разброс скоростей электронов равен  $\Delta V_t/V_t = 2\%$ .

Нормированное значение магнитостатического поля –  $F = \frac{\mu_0 \eta_0 H_{z0}}{\omega_0} = 1,0875$ . Длина гиротрона  $l = \frac{2\pi L}{\lambda_0} = \frac{2\pi 90}{2,73} = 184$  радиан.

Функция, которая описывала профиль волновода, определялась следующими параметрами.

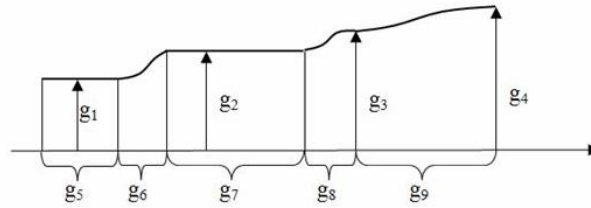


Рис. 1. Параметры, определяющие профиль волновода

Для заданного в [4] профиля волновода нормированные параметры задавались следующими:  $g_1 = \frac{2\pi R_1}{\lambda_0} = \frac{2\pi 19,4\text{mm}}{2,73\text{mm}} = 44,65$ ,  $g_2=45,665$ ,  $g_3=46,95$ ,  $g_4=48,33$ ,  $g_5=23$ ,  $g_6=23$ ,  $g_7=46$ ,  $g_8=46$ ,  $g_9=46$ .

Нормированный радиус ведущего центра электронных орбит –  $r_{vc} = \frac{2\pi 10,24}{2,73} = 23,57$ .

Результаты расчета данного варианта гиротрона приведены на рис. 2.

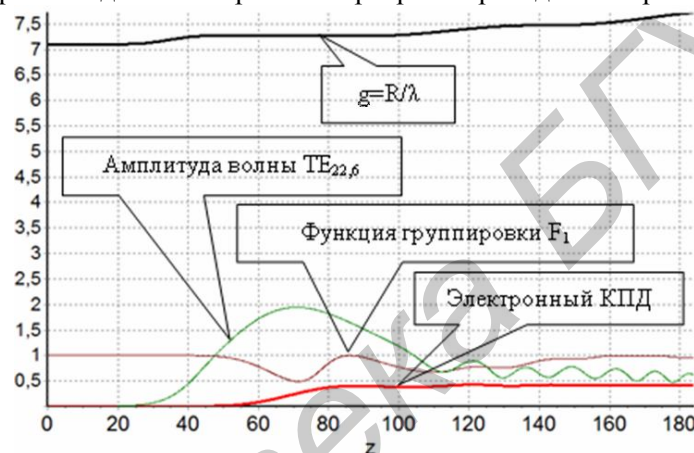


Рис. 2. Интегральные характеристики гиротрона

Как видно на рис. 2, амплитуда волны  $TE_{22,6}$  в активной области резонатора похожа на синусоиду. Электронный КПД этого гиротрона по нашим расчетам составляет 40,5%. Расчеты по программе *MAGY* показали значение 39% [4]. Это говорит о хорошем совпадении расчетных данных полученных по программе *GYRO-K* и программе *MAGY*.

Для проведения расчетов многомодового гиротрона была использована следующая функция для описания профиля волновода.

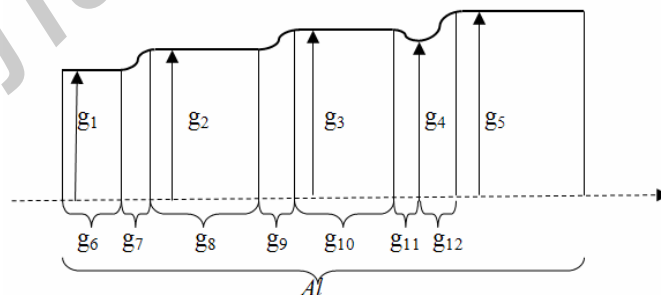


Рис. 3. Параметры, определяющие профиль многомодового волновода

В результате оптимизации профиля волновода был получен следующий вариант двухмодового гиротрона. Параметры, определяющие профиль волновода, получили следующие значения:  $g_1=41,5109$ ,  $g_2=42,4272$ ,  $g_3=46,0768$ ,  $g_4=49,0268$ ,  $g_5=50,9772$ ,  $g_6=10,0$ ,  $g_7=8,8921$ ,  $g_8=12,7941$ ,  $g_9=11,982$ ,  $g_{10}=12,7628$ ,  $g_{11}=12,001$ ,  $g_{12}=10,0$ .

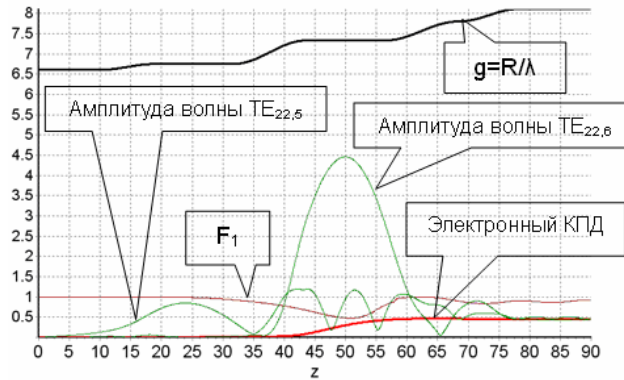


Рис. 4. Интегральные характеристики двухмодового гиротрона

В отличие от гиротрона, характеристики которого приведены на рис. 2, в данном гиротроне на участке  $15 < z < 35$  взаимодействие электронного потока происходит с волной  $TE_{22,5}$ , а на участке  $40 < z < 62$  с волной  $TE_{22,6}$ .

Возбуждаемая волна  $TE_{22,5}$  имеет существенно меньшую амплитуду по сравнению с возбуждаемой волной  $TE_{22,6}$ . Это позволяет более эффективно группировать фазовый электронный сгусток электронов, т.е. он получается более сжатым и при этом не происходит такого сильного динамического разброса скоростей электронов как в одномодовом гиротроне, что в итоге позволяет повысить электронный КПД данного гиротрона до 45%.

Следует отметить, что влияние моды  $TE_{22,5}$  сказывается и на участке максимума моды  $TE_{22,6}$ . В итоге на выходе гиротрона обе волны имеют приблизительно одинаковую амплитуду и следовательно одинаковый волновой КПД по 22,5%.

### Заключение

Приведенные в статье материалы свидетельствуют о перспективности многомодовых гиротронов в отношении повышения КПД. Заметим, что в таких гиротронах на выходе резонатора сигнал оказывается многомодовым. Однако использованные трансформаторы мод на регулярном волноводе, конструкция и расчет которых для  $TE_{0n}$ -мод приведены в [5], позволяет преобразовать сигнал в одномодовый (например, смесь  $TE_{22,5} + TE_{22,6}$  в моду  $TE_{22,5}$  или  $TE_{22,6}$ ).

## TWO-WAVE GYROTRON ON WHISPERING GALLERY MODES

S.V. KOLOSOV, A.A. KURAYEV, A.V. SENKO

### Abstract

The possibilities of improving the efficiency of millimeter-wave gyrotron with multimode interaction fields of whispering gallery waves and a relativistic helical electron beam were considered. It is shown that two-mode gyrotron, compared with single-mode, allows to raise the efficiency from 40 to 45%.

### Список литературы

1. Кураев А.А., Ковалев И.С., Колосов С.В. Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ. Мн., 1975.
2. Kolosov S.V., Kurayev A.A., Senko A.V. // The simulation code CEDR IVEC-2010. USA. P. 115–116.
3. Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. // Техника и приборы СВЧ. 2009, №2 С. 8–13.
4. James P. Anderson // Experimental Study of a 1.5-MW, 110 – GHz Gyrotron Oscillator Massachusetts Institute of Technology. 2005. P. 171.
5. Батура М.П., Кураев А.А., Синецын А.К. // Моделирование и оптимизация мощных электронных приборов СВЧ. Мн., 2006.

УДК 542.34

## ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛИРОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ И АКТИВНОСТЬ КАВИТАЦИИ

Н.В. ДЕЖКУНОВ, А.В. КОТУХОВ, В.А. СТОЛЕР, В.А. КОЛТОВИЧ, А.Л. НИКОЛАЕВ\*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*\*Московский государственный университет  
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991, Российская Федерация*

*Поступила в редакцию 16 января 2011*

Исследовалась динамика развития кавитационной области, генерируемой высокоинтенсивным фокусированным ультразвуком в непрерывных и импульсно модулированных ультразвуковых полях. Показано, что импульсное модулирование ультразвукового поля позволяет управлять динамикой развития кавитационной области и активностью кавитации в целом.

*Ключевые слова:* ультразвук, кавитация, звуколюминесценция, звукохимия.

### Введение

Фокусированные ультразвуковые поля широко используются в медицине для целей терапии [1] и диагностики [2, 3]. Разрешающая способность диагностических аппаратов во многом определяется интенсивностью ультразвука. Однако повышение интенсивности выше порога кавитации может приводить к нежелательным воздействиям, вызывая разрушения тканей. В терапевтических применениях часто необходимо реализовать достаточно высокие интенсивности, поддерживая при этом режим озвучивания докавитационным [1, 2]. В последние годы расширяются также применения, в которых терапевтический эффект достигается за счет воздействия кавитации на физико-химические процессы в клетках и межклеточном пространстве [4–8]. В таких применениях уровень активности кавитации должен поддерживаться постоянным.

В данной работе исследовалась возможность управления активностью кавитации и динамикой развития кавитационной области путем импульсного модулирования ультразвукового поля.

### Методика и установка

Схема использовавшейся экспериментальной ячейки представлена на рис. 1. Детальное описание установки и методики измерений дано в работах [9, 10].

Рабочая емкость представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 10 см и высотой 16 см. На боковой поверхности ячейки навита медная трубка, через которую прокачивается термостатирующая жидкость. Пьезокерамический фокусирующий излучатель 4 диаметром 65 мм вмонтирован через отверстие в днище емкости с помощью тефлоновой крышки, навинчиваемой на емкость. Резонансная частота излучателя – 880 кГц. На уровне фокального пятна излучателя в боковой поверхности емкости выполнено окно, в котором, установлен световод фотоумножителя. Торец емкости, противоположный излучателю, снабжен конической



крышкой, покрытой изнутри звукопоглощающей гофрированной резиной, чем обеспечивается режим, близкий к режиму бегущей волны. Гидрофон вмонтирован через крышку емкости таким образом, что его приемный пьезокерамический элемент диаметром 2 мм и толщиной 0,25 мм находится за фокальным пятном излучателя на расстоянии 25 мм от него.

Выходные сигналы фотоумножителя  $L$  и гидрофона  $H$  (после предварительного усиления) подавались на запоминающий осциллограф и анализировались с использованием компьютера. Примеры регистрации  $L$  и  $H$  представлены на рис. 1, б.

Измерения, выполненные с использованием калиброванного гидрофона, показали, что в докавитационном режиме звуковое давление  $P$  в фокальном пятне излучателя связано с напряжением  $U$  на высокочастотном (ВЧ) излучателе следующим соотношением:  $P(10^5 \text{ Па}) = k \times U(\text{В})$ , а излучаемая мощность во всем исследованном диапазоне напряжений пропорциональна  $U^2$  с точностью не ниже точности измерений. Здесь  $k = 0,093 \text{ Па/В}$ .

Подготовка к эксперименту включала следующие операции. Емкость заполнялась жидкостью из вспомогательного резервуара через сливную трубку в ламинарном режиме, чтобы предотвратить захват пузырьков газа в процессе заполнения. Ячейка заполнялась рабочей жидкостью и отстаивалась в течение двух суток. Затем жидкость дегазировали под действием ультразвука в течение 20 мин при напряжении на излучателе 170 В ( $\approx 10 \text{ Вт/см}^2$ ). Газосодержание под действием ультразвука уменьшалось на 20–25 % по сравнению с равновесным [10–12]. Предварительная частичная дегазация жидкости существенно повышает воспроизводимость результатов, так как после такой обработки концентрация воздуха в жидкости под действием ультразвука при проведении эксперимента практически не меняется. После дегазации ячейку закрывали крышкой, при этом жидкость не контактировала с воздухом.

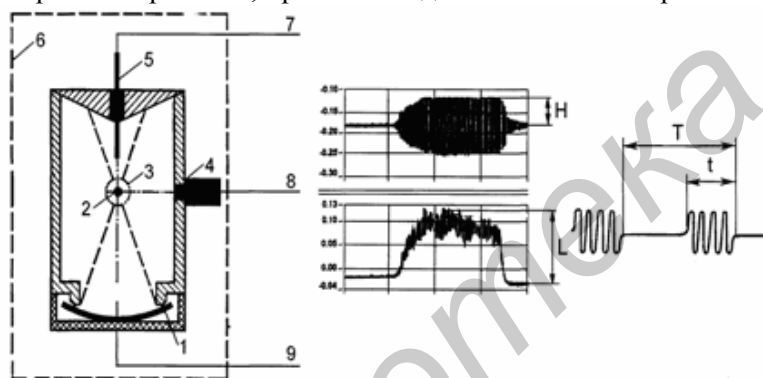


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки: 1 – излучатель, 2 – фокальное пятно, 3 – кавитационная область, 4 – фотоумножитель, 5 – гидрофон, 6 – светонепроницаемый короб, 7, 8 – на осциллограф, 9 – от генератора; выходные сигналы гидрофона (верхний) и фотоумножителя (нижний)

При исследовании зависимости интенсивности звуколюминесценции (ЗЛ) от периода следования импульсов  $T$  величину  $T$  меняли начиная с  $T = 2000 \text{ с}$  в сторону уменьшения, т. е. слева направо (см. рис. 2 и 4). Длительность же импульса  $\tau$  меняли, увеличивая  $\tau$  от 0,1 мс.

Такой порядок изменения  $T$  и  $\tau$  был выбран с тем, чтобы по возможности уменьшить влияние предыдущего эксперимента на результат последующего. В промежутке времени между двумя последовательными импульсами жидкость релаксирует в направлении к исходному состоянию.

Измерения производились после 10-секундной экспозиции при выбранных значениях  $T$ ,  $\tau$  и  $U$ . Время отстаивания между двумя измерениями – 30 с, время отстаивания после серии измерений (запись одной зависимости) – 30 м.

Напряжение увеличивалось линейно со временем. Свечение с интенсивностью выше уровня фоновых помех в приведенном на рис. 2 примере возникает на 14-й секунде после начала эксперимента. Этот момент отмечен на рисунке стрелкой  $Th_1$ . Незадолго до возникновения ЗЛ отмечено отклонение выходного сигнала гидрофона от линейной зависимости от времени. Одновременно с возникновением ЗЛ меняется характер зависимости  $H(t)$ , а именно: появляется значительный разброс импульсов, регистрируемых гидрофоном.

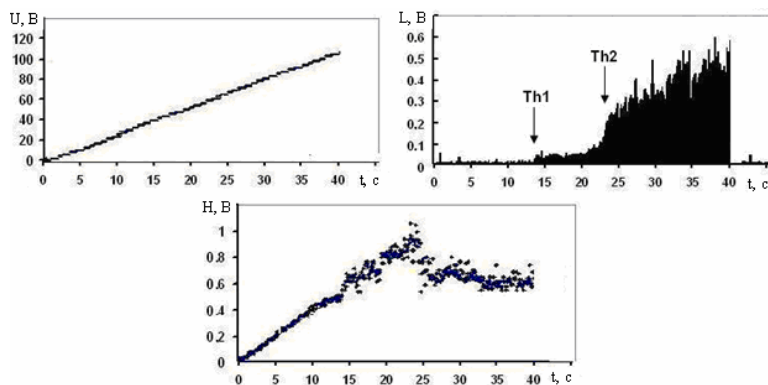


Рис. 2. Динамика развития кавитационной области при плавном увеличении напряжения на излучателе:  $T = 30$  мс,  $\tau = 3$  мс

зависимости  $H(t)$  от прямой линии и разброс интенсивностей звуковых импульсов вызваны, очевидно, появлением пузырьков в фокальной зоне излучателя. Большие стабильно пульсирующие полости и коллапсирующие пузырьки в стадии роста снижают акустическую прозрачность фокальной зоны, что может быть причиной снижения пиковой интенсивности импульсов, регистрируемых гидрофоном. Захлопывающимися полостями генерируются ударные волны, которые являются причиной импульсов повышенной интенсивности.

На рис. 3 приведены зависимости интенсивности ЗЛ от времени при постоянном напряжении на излучателе для различных периодов  $T$  следования импульсов ультразвукового поля. Время  $\Delta t$ , необходимое для возникновения кавитации, т.е. пороговое время возникновения кавитации уменьшается при уменьшении  $T$ , т.е. при уменьшении скважности. Если при больших  $T$  (рис. 3,а и 3,б) интенсивность ЗЛ растет медленно после включения ультразвука, то при малых  $T$  (или больших  $\tau$ ) наклон  $L(T)$  увеличивается, т.е. увеличивается скорость роста  $L$ .

Далее, из рис. 3 следует, что с увеличением периода следования импульсов ультразвука время задержки возникновения кавитации по отношению к началу озвучивания увеличивается. Аналогичная зависимость имеет место при уменьшении длительности импульсов. Таким образом, увеличивая  $T$  и уменьшая  $\tau$ , можно обеспечить докавитационный режим озвучивания при достаточно большой интенсивности ультразвука.

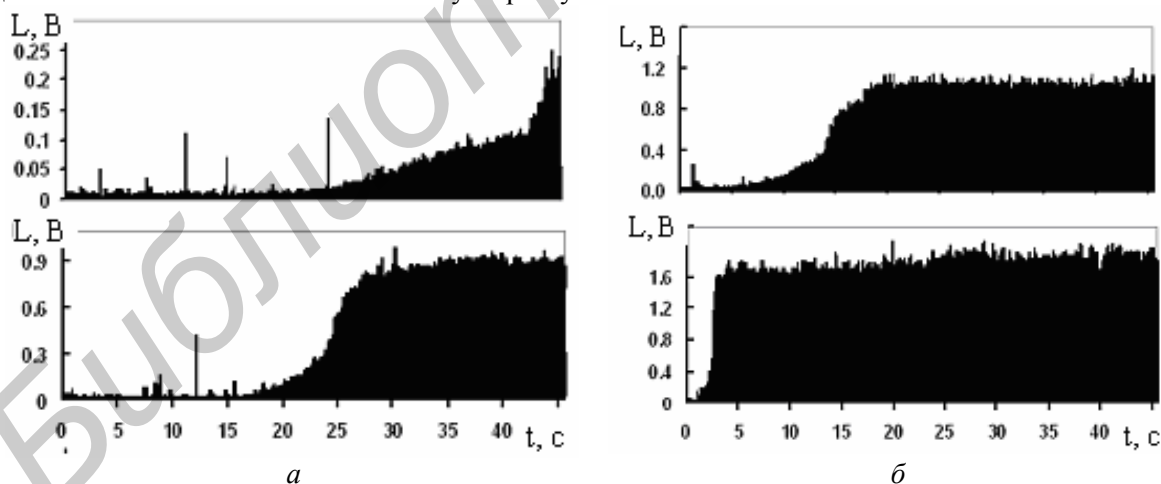


Рис. 3. Динамика развития кавитационной области при постоянном напряжении на излучателе и различных периодах следования импульсов ультразвукового поля:  $U = 175$  В,  $\tau = 3$  мс, (а)  $T = 150$  мс (верхний), 75 мс (нижний); (б) 35 мс (верхний) и 10 мс (нижний)

На рис. 4 и 5 представлены характерные зависимости интенсивности ЗЛ (сплошные линии) и зависимости сигнала, снимаемого с гидрофона (штриховые линии), от периода следования импульсов  $T$  ультразвука и от длительности импульсов  $\tau$  соответственно.

При некотором критическом значении напряжения  $U$  наклон зависимости  $L(t)$  изменяется скачком, т.е. скорость роста интенсивности ЗЛ резко увеличивается. Этот момент отмечен на рисунке как  $Th_2$  – второй порог. Быстрый рост интенсивности ЗЛ сопровождается соответствующим быстрым падением выходного сигнала гидрофона и увеличением разброса пиковых значений  $H$ . Отклонение

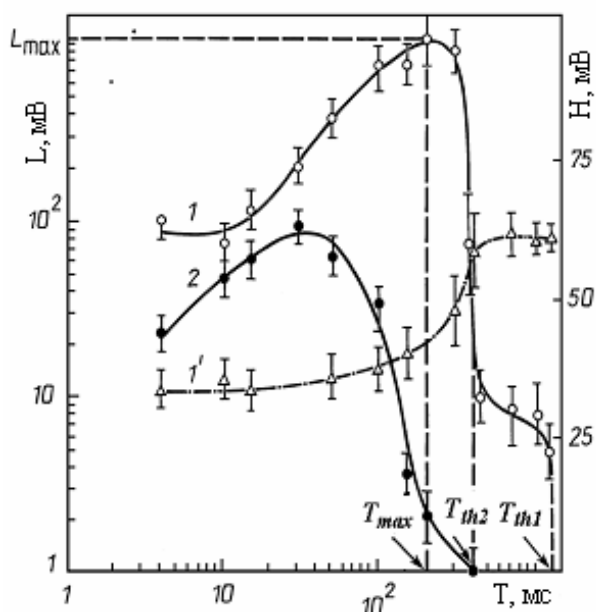


Рис. 4. Зависимости интенсивности звуколюминесценции  $L$  (кривые 1, 2) и выходного сигнала гидрофона  $H$  (кривая 1') от периода следования  $T$  импульсов ультразвукового поля: рабочая жидкость – дистиллированная вода,  $t = 23^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3$  мс,  $U = 120$  В (1) и 55 В (2). Величины  $T_{th2}$ ,  $T_{th1}$  и  $T_{max}$  показаны для кривой 1

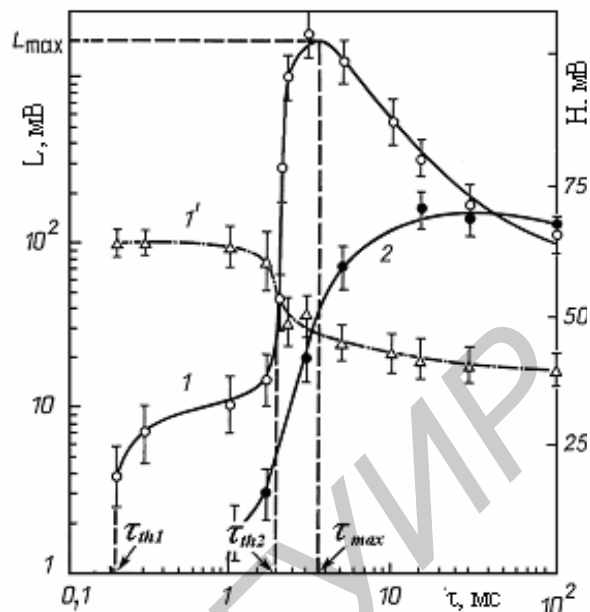


Рис. 5. Зависимости интенсивности звуколюминесценции  $L$  (кривые 1, 2) и выходного сигнала гидрофона  $H$  (кривая 1') от длительности  $\tau$  импульсов ультразвукового поля: рабочая жидкость – дистиллированная вода,  $t = 23^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3$  мс,  $U = 120$  В (1) и 55 В (2). Величины  $\tau_{th2}$ ,  $\tau_{th1}$  и  $\tau_{max}$  показаны для кривой 1

Если  $T$  достаточно велико ( $> 2000$  мс для условий эксперимента, результаты которого представлены на рис. 4), то звуколюминесценция отсутствует. При уменьшении периода следования импульсов  $T$  (и постоянных  $U$  и  $\tau$ ) ЗЛ возникает при некотором пороговом  $T = T_{th1}$ , увеличивается вначале медленно, а затем, начиная с некоторых критических значений  $T = T_{th2}$  – наблюдается значительное увеличение наклона зависимости  $L(T)$ . Интенсивность ЗЛ достигает максимума и начинает уменьшаться, стремясь к некоторому предельному значению. При больших интенсивностях ультразвука (кривая 1, рис. 4) увеличение интенсивности ЗЛ при  $T = T_{th2}$  носит явно выраженный скачкообразный (пороговый) характер, при котором уменьшение  $T$  на 15–20% приводит к увеличению  $L$  почти на два порядка.

Таким образом, и в данном случае можно выделить два порога кавитации: первый ( $T_{th1}$ ) соответствует возникновению звуколюминесценции, второй ( $T_{th2}$ ) – резкому увеличению ее интенсивности (или изменению наклона зависимости  $L(T)$ ). Отметим, что впервые этот эффект наблюдался нами в работе [11]. Интенсивность сигнала, принимаемого гидрофоном (штриховая линия, рис. 4), с уменьшением периода вначале меняется незначительно, точнее – в пределах ошибки измерений. При  $T = T_{th2}$  наблюдается быстрое падение выходного сигнала гидрофона, что указывает на соответствующее увеличение поглощения ультразвука.

Аналогичным же образом изменяется величина  $L$  с ростом длительности импульсов  $\tau$  при постоянных  $T$  и  $U$  (рис. 5). Как и в первом случае, можно выделить два порога  $\tau_{th1}$  и  $\tau_{th2}$ . При  $\tau = \tau_{th1}$  звуколюминесценция возникает, при  $\tau = \tau_{th2}$  наблюдается резкое изменение наклона зависимости  $L(\tau)$  (кривая 1, рис. 5) и увеличение поглощения ультразвука в кавитационной области (кривая 2, рис. 5).

### Обсуждение результатов

Как видно из рис. 2, можно выделить следующие стадии развития кавитационной области в импульсно модулированном ультразвуковом поле.

1. Первая стадия, вероятно, связана с возникновением нелинейно пульсирующих кавитационных пузырьков. Поглощение ультразвука на этой стадии практически не увеличивается

по сравнению с поглощением в жидкости без пузырьков. Это указывает на то, что объемная доля пузырьков незначительна. Вероятно, существенно вырастают пузырьки резонансного размера или близкого к резонансному.

2. На второй стадии развития кавитационной области возникает звуколюминесценция, что сопровождается незначительным увеличением поглощения ультразвука. Интересно, что в этом режиме в импульсно модулированных ультразвуковых полях интенсивность ЗЛ мало меняется при увеличении интенсивности ультразвука в довольно широком диапазоне интенсивностей. Увеличение поглощения ультразвука может быть вызвано увеличением числа и размеров больших пульсирующих кавитационных пузырьков, поглощающих и рассеивающих ультразвуковые колебания. Эти пузырьки являются стабильными, не захлопываются и не генерируют звуколюминесценции, а, следовательно, не могут оказывать сколько-нибудь существенного воздействия на звукохимические реакции и другие процессы в жидкостях.

3. Переход к третьей стадии развития кавитационной области сопровождается быстрым увеличением интенсивности звуколюминесценции и поглощения ультразвука в кавитационной области, что указывает на увеличение числа кавитационных пузырьков и эффективности их захлопывания. Отметим, что переход от режима 2 к режиму 3 может происходить и произвольно, при постоянном напряжении на излучателе (рис. 3). При этом интенсивность звуколюминесценции в некоторых случаях увеличивается более, чем в 10 раз, а поглощение ультразвука – в несколько раз.

Увеличение времени задержки начала кавитации по отношению к моменту включения колебаний с ростом периода следования импульсов ультразвука  $T$  (рис. 4) обусловлено тем, что в исходной жидкости отсутствуют микропузырьки, которые могли бы кавитировать при данной интенсивности ультразвука. Под действием ультразвука имеющиеся зародыши начинают расти за счет выпрямленной диффузии. В промежутке времени  $T - \tau$  между двумя последовательными импульсами размер пузырьков уменьшается за счет диффузии газа из пузырька в жидкость под действием давления поверхностного натяжения. С ростом  $T$  этот промежуток также увеличивается, что и приводит к результирующему снижению скорости роста пузырьков, соответственно увеличивается время экспозиции.

Наличие порогового  $\tau$  (первый порог, рис. 5) при заданной интенсивности ультразвука может быть объяснено следующим образом. В момент включения ультразвука в фокальном пятне излучателя отсутствуют пузырьки с размером порядка резонансного, которые могли бы кавитировать при данной интенсивности ультразвука. Под действием ультразвуковых колебаний зародыши кавитации начинают увеличиваться в размерах вследствие выпрямленной диффузии. Время роста равно длительности импульса  $\tau$ . В промежутке времени  $T - \tau$  между двумя импульсами размеры пузырьков уменьшаются. Если за время  $T - \tau$  характерный размер пузырьков успевает уменьшиться до исходного  $R_0$ , то за достаточно большой промежуток времени ( $t \gg T$ ) в среднем не наблюдается увеличения размеров зародышей. Следовательно, в этом случае  $\tau$  ниже порогового  $\tau_{th1}$ .

Если же  $\tau$  достаточно велико, то диаметр пузырька не успевает уменьшиться до исходного за время  $T - \tau$ . В результате за время  $t \gg T$  будет наблюдаться рост размеров пузырька, и за принятое время наблюдения он может вырасти до резонансного размера, при котором начинается интенсивное захлопывание, сопровождающееся характерными эффектами: генерированием ударных волн и звуколюминесценцией. Таким образом, в этом случае  $\tau$  равно или больше, чем  $\tau_{th1}$ . При увеличении интенсивности ультразвука, очевидно, увеличивается и скорость роста кавитационных пузырьков.

Резкое увеличение скорости роста  $L$  при  $\tau = \tau_{th2}$  связано с началом быстрого размножения кавитационных пузырьков по механизму цепной реакции, предложенному в работе.

Рассмотрим теперь возможные причины, по которым  $L(\tau)$  уменьшается после достижения максимума. Как отмечено в [10, 11], уменьшение интенсивности ЗЛ после достижения некоторой максимальной величины  $L$  может быть обусловлено следующими факторами: а) усилением взаимодействий пузырьков вследствие увеличения их концентрации, что может быть одной из причин уменьшения эффективности захлопывания; б) экранированием кавитационной области пузырьками, находящимися на ее периферии; в) увеличением концентрации больших неэффективных пузырьков, которые пульсируют не захлопываясь и, следовательно, практически не воздействуют на физико-химические процессы в жидкостях, поглощая

при этом значительную долю акустической мощности; г) образованием кластеров кавитационных полостей. Ясно, что при большей длительности импульсов ультразвука (и постоянном периоде  $T$ ) с течением времени быстрее растет как концентрация пузырьков, так и их размеры. Следовательно, быстрее растут и размеры кавитационных кластеров. Поэтому роль всех перечисленных выше факторов (снижающих эффективность преобразования и концентрации энергии кавитационными полостями) усиливается с ростом  $\tau$ , что и вызывает снижение активности кавитации.

Таким образом, наличие максимума на зависимости интенсивности звуколюминесценции от длительности импульсов  $\tau$  (рис. 3, рис. 5) обусловлено конкурирующим влиянием двух факторов, связанных с увеличением концентрации кавитационных полостей и их размеров в кавитационной области: это – увеличение числа кавитационных событий (коллапсов) в единицу времени, с одной стороны, и уменьшение эффективности концентрации энергии пузырьками при захлопывании – с другой. При  $\tau < \tau_{\max}$  преобладающим фактором является рост числа кавитационных событий; интенсивность ЗЛ растет с ростом  $\tau$  в этом диапазоне  $\tau$ . При  $\tau > \tau_{\max}$  преобладающим становится второй фактор – уменьшение эффективности преобразования и концентрации энергии пузырьками при их захлопывании, что приводит к уменьшению интенсивности ЗЛ с ростом  $\tau$  в данном диапазоне  $\tau$ . Аналогичными же причинами обусловлено уменьшение активности кавитации после достижения максимума с уменьшением периода следования  $T$  импульсов ультразвука.

### Заключение

Показано, что импульсное модулирование ультразвукового поля позволяет управлять динамикой развития кавитационной области и активностью кавитации в целом. Выделено три стадии развития кавитационной области, характеризующиеся различным уровнем активности кавитации и концентрацией кавитационных полостей.

Установлено, что зависимости активности кавитации от периода следования и длительности импульсов ультразвукового поля имеют вид кривой с максимумом. При оптимальных параметрах импульсов интенсивность звуколюминесценции в импульсно модулированном ультразвуковом поле может превосходить ее величину в непрерывном поле более, чем на порядок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований.

## THE INFLUENCE OF PULSE MODULATION OF AN ULTRASOUND FIELD ON THE DYNAMICS OF CAVITATION ZONE DEVELOPMENT AND ON CAVITATION ACTIVITY

N.V. DEZHKUNOV, A.V. KOTUKHOV, V.A. STOLER, V.A. KOLTOVICH, A.L. NIKOLAEV

### Abstract

The dynamics of the cavitation zone development has been studied. Cavitation zone was generated by high intensity focused ultrasound (HIFU) in pulsed mode. Three stages of the process were identified. Sonoluminescence (SL) is absent at the first stage. The output signal of the hydrophone which is placed above the focal point of the transducer is constant if the voltage applied to the transducer is constant. It is increased linearly if the ultrasound intensity is increased linearly. The sonoluminescence is appeared at the second stage. Its intensity is increased slowly at this stage.

### Список литературы

1. Улащик В.С., Чиркин А.А. Ультразвуковая терапия, Минск, 1983.
2. Щупакова А.Н., Литвяков А.М. Клиническая ультразвуковая диагностика: учебн. пособие для студентов вузов по специальности. Мн., 2004.
3. Волков Н.В. Основы ультразвуковой диагностики: учебно-методическое пособие для студентов по специальности лечебное дело. Гродно, 2005.
4. Самосюк И.З., Шимков Г.Е., Чухраев Н.В. и др. Терапия ультразвуковыми волнами. Киев, 2003.
5. Николаев А.Л., Гопин А.В., Божевольнов В.Е. и др. // Акустический журнал. Т. 55, № 4–5. 2009. С. 565–574.
6. Douglas L. Miller, Chunyan Dou. // Induction of Apoptosis in Sonoporation and Ultrasonic Gene Transfer. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2009. Vol. 35. P. 144–154.
7. Rui Li, Hui Zhong. Effects of Ultrasonic Cavitation on Migration of Tumor Cells. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2009. Vol. 35. P. S235–S236.
8. Raffi Karshafian, Peter D. Bevan, Ross Williams et al. // *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2009. Vol. 35. P. 847–860.
9. Дежкунов Н.В. Письма в Журнал технической физики. 2008. Вып. 8. С. 59–67.
10. Дежкунов Н.В. Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, № 1. С. 120–127.
11. Dezhkunov N.V., Francescutto A., Ciuti P. et al. // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2000. №7. P. 19–24.
12. Dezhkunov N.V., Francescutto A., Nikolaev A.L. et al. // Book of abstracts of 12th meeting of the European society of sonochemistry. Greece. 30 May–03 June. 2010. P. 108.





## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «ДОКЛАДЫ БГУИР»

1. К публикации принимаются материалы, касающиеся результатов **оригинальных научно-технических исследований и разработок, не опубликованные и не предназначенные для публикации в других изданиях**. Тематика представляемого материала должна соответствовать рубрикам журнала (электроника, радиофизика, радиотехника, информатика).

2. Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать: соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений (с указанием адреса), в которых выполнялось исследование; ключевые слова (до 10 слов) на русском языке; аннотацию на русском и английском языках (3–5 предложений); рекомендуется стандартизировать текст статьи, используя подзаголовки **введение, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и их обсуждение, заключение, литература**.

3. Статья представляется на листах формата А4 в двух экземплярах с одиночным интервалом между строками и в электронном виде файлом формата MS Word (\*.doc). Также необходимо представить *акт экспертизы* о возможности опубликования статьи в открытой печати.

### **Объем статей (и иллюстраций, содержащихся в статье):**

для оригинальной статьи – не более 7 страниц и 8 иллюстраций, для краткого сообщения – не более 2 страниц и 2 иллюстраций.

4. При наборе текста используются шрифты – Times New Roman и Symbol, размер 11 pt. Установливаемый размер бумаги – А4 210×297 мм. Поля слева, справа, сверху и снизу – по 25 мм.

**Формульные выражения** выполняются только в MathType, стиль «Математика», шрифты Times New Roman и Symbol, размер 11 pt, математические функции и цифры набираются прямым начертанием.

### **Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:**

- рисунок должен быть оформлен как графический объект;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках по начертанию и размеру должны соответствовать обозначениям в тексте статьи;
- размер рисунка – не более 15×20 см, желательно в портретной ориентации;
- текстовая информация и условные обозначения выносятся из рисунка в текст статьи или подрисуночные подписи.

Сканированные фотографии или выполненные в графических редакторах иллюстрации должны быть представлены в виде черно-белых или полутоновых графических файлов форматов \*.jpg, \*.tif, \*.bmp с разрешением 300 dpi.

**Все иллюстрации** сопровождаются подрисуночными подписями. Их следует помещать в виде самостоятельных абзацев после ссылок на иллюстрации в тексте статьи. Подрисуночные подписи обязательно должны включать в себя название иллюстрации и при необходимости могут содержать условные обозначения.

6. Термины и определения, единицы физических величин, употребляемые в статье, должны соответствовать действующим ГОСТам.

7. Математические функции и цифры набираются прямым начертанием. Латинские буквы набираются курсивом, греческие символы остаются прямыми.

8. Формулы в тексте следует нумеровать подряд в круглых скобках. Нумеровать рекомендуется те формулы, на которые имеются ссылки в последующем тексте.

9. Ссылки на литературу приводятся в порядке их появления в тексте статьи и заключаются в квадратные скобки; цитирование двух или более работ под одним номером не допускается.

10. Подстрочные замечания отмечаются звездочками.

Адрес для пересылки рукописей в электронной форме и переписки с редакцией: [doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by).