

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Применение адаптивных наблюдателей для идентификации системы с гистерезисом Бука-Вена Н.Н. Карабутов, А.М. Шмырин.....	7
Алгоритмизация управления эргатическим элементом производственной системы в экстремальных условиях С.П. Полуэктов, В.С. Струков, А.А. Копылов, М.В. Себелев, В.Л. Бурковский.....	14
Модель случайного множественного доступа в локальной вычислительной сети с потоками различной интенсивности и приоритетов А.В. Лебедев П.В. Зобов.....	22
Моделирование базы знаний для поддержки эксплуатации технологического оборудования О.Н. Основина, П.И. Жуков.....	30
Моделирование стационарного процесса работы термоэлектрических генераторных модулей кольцевой геометрии О.В. Калядин, К.Г. Королев.....	38
Интерактивный метод нейрорегулирования процессом измельчения шихты в цементном производстве Л.С. Казаринов, Дж.Р. Хасанов.....	46

Радиотехника и связь

Оптимизация проектирования декодеров низкоплотностных кодов на основе модифицированного алгоритма min-sum М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова, А.О. Кузнецова, Т.Д. Ижокина.....	54
Оценка канала связи с MIMO-OFDM системы обмена данными между транспортными средствами на основе сотовой сети с сильными помехами О.Н. Чирков, И.М. Пашуева, Э.Э. Каграманов.....	61
Метод подобия траекторий для устранения неоднозначности фазовых измерений Б.В. Матвеев, В.А. Иванов, А.А. Макаров.....	67
Применение стохастического кодирования в системах с решающей обратной связью А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, Д.А. Пухов, А.С. Демихова.....	72
Двухканальный генератор-манипулятор прямоугольных импульсов Д.В. Журавлев, М.А. Сиваш, А.С. Костюков, Д.И. Наумов, В.А. Мальцев.....	77
Принципы защиты печатных модулей электронных средств от электростатического разряда на этапах производства и тестирования М.А. Ромащенко, Д.С. Сеимова, С.Н. Рожненко.....	83
Актуальные подходы к оценке канала радиосвязи в системе подвижных абонентов с высокой скоростью перемещения О.Н. Чирков.....	89
Анализ перспективных подходов к созданию электрически малых антенн с эффективностью, приближающейся к определяемой в соответствии с критерием Чу-Харрингтона-Ли Ю.Г. Пастернак, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров, М.А. Сиваш.....	94
Методика междисциплинарного инженерного анализа конструкций РЭС на основе программируемых материалов С.С. Потапов, Н.В. Ципина, Ю.В. Худяков, Т.Д. Ижокина, А.О. Кузнецова.....	103

Машиностроение и машиноведение

Влияние вакуумного отжига на топографию поверхностей разрушения и повторно–статическую выносливость сплава ОТ4

А.Б. Булков, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский, Д.И. Бокарев, Г.В. Селиванов..... 113

Исследование влияния скорости резания на формирование скрытой кинематической связи при протягивании внутренних винтовых канавок с большими углами подъема спирали

В.В. Куц, Д.С. Гридин..... 121

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Application of adaptive observers for system identification with Bouc-Wen hysteresis N.N. Karabutov, A.M. Shmyrin.....	7
Algorithmization of management of ergatic element of production system in extreme conditions S.P. Poluektov, V.S. Strukov, A.A. Kopylov, M.V. Sebelev, V.L. Burkovskiy.....	14
Model of random multiple access in a local computer network with flows of various intensity and priorities A.V. Lebedev, P.V. Zobov.....	22
Modeling the knowledge base to support operation of technological equipment O.N. Osnovina, P.I. Zhukov.....	30
Simulation of stationary process of thermoelectric generator modules of ring geometry O.V. Kalyadin, K.G. Korolev.....	38
Interactive method of neural control of process of milling mixture in cement production L.S. Kazarinov, Dzh.R. Khasanov.....	46

Radio engineering and communication

Optimization of designing decoders of low-density codes based on the modified min-sum algorithm M.V. Khoroshaylova, I.V. Sviridova, A.O. Kuznetsova, T.D. Izhokina	54
Assessment of the MIMO-OFDM communication channel of data exchange between vehicles based on a cellular network with strong interference O.N. Chirkov, I.M. Pashueva, E.E. Kagramanov.....	61
Trajectory similarity method for disambiguating phase measurements B.V. Matveev, V.A. Ivanov, A.A. Makarov.....	67
Application of stochastic coding in solution feedback systems A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, D.A. Pukhov, A.S. Demikhova.....	72
Double-channel generator-manipulator of rectangular pulse D.V. Zhuravlev, M.A. Sivash, A.S. Kostyukov, D.I. Naumov, V.A. Mal'tsev.....	77
Principles of protection of printed electronic modules from electrostatic discharge at the stages of production and testing M.A. Romashchenko, D.S. Seimova, S.N. Rozhenko.....	83
Actual approaches to the assessment of the radio communication channel in the system of mobile subscribers with a high speed of movement O.N. Chirkov.....	89
Analysis of perspective approaches to the creation of electrically small antennas with efficiency approaching the defined in accordance with the Chu-Harrington-Lee-criterion Yu.G. Pasternak, E.A. Rogozin, R.E. Rogozin, S.M. Fyedorov, M.A. Sivash.....	94
Method of interdisciplinary engineering analysis of electronics structures based on programmable materials S.S. Potapov, N.V. Tsipina, Yu.V. Khudyakov, T.D. Izhokina, A.O. Kuznetsova.....	103

Mechanical engineering and science of machines

Influence of vacuum annealing on topography of destruction surfaces and repeated-static endurance of alloys OT4

A.B. Bulkov, V.V. Peshkov, A.B. Kolomenskiy, D.I. Bokarev, G.V. Selivanov..... 113

Research of the influence of cutting speed on the formation of hidden kinematic connection when strengthening internal helical grooves with large angles of spiral lifting

V.V. Kuts, D.S. Gridin..... 121

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.6.001

УДК 681.5.015

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИСТЕМЫ С ГИСТЕРЕЗИСОМ БУКА-ВЕНА**Н.Н. Карабутов¹, А.М. Шмырин²**¹**МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия**²**Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия**

Аннотация: предложен метод адаптивной идентификации системы с гистерезисом Бука-Вена. Он основан на применении адаптивных наблюдателей. Такой подход позволяет снять проблему устойчивости решения уравнения гистерезиса. Показано, что свойства входа существенно влияют на решение задачи идентификации. Нелинейная система с гистерезисом Бука-Вена должна быть структурно идентифицируемой. Показано, что для выполнения условия структурной идентифицируемости системы вход должен быть S-синхронизирующим. Предложен выбор параметров адаптивного наблюдателя. Синтезированы адаптивные алгоритмы идентификации процессов в адаптивной системе. Для их получения применен второй метод Ляпунова. Выделены две подсистемы, анализ свойств которых упрощает анализ устойчивости системы. Показана ограниченность процессов в подсистемах адаптивной системы. Точность получаемых оценок зависит от величины производной выходной переменной. Предложен способ определения текущей оценки неопределенности в адаптивной системе. Получаемая неопределенность является текущим эталоном для оценки выхода гистерезиса. Она используется для синтеза алгоритмов настройки параметров модели Бука-Вена. Для идентификации гистерезиса Бука-Вена применена адаптивная модель, совпадающая с уравнением адаптивного наблюдателя. Приведены результаты моделирования, которые подтверждают работоспособность предложенного подхода

Ключевые слова: гистерезис, модель Бука-Вена, адаптивный наблюдатель, неопределенность

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта 19-48-480007 p_a

Введение

Для описания гистерезиса применяются различные модели [1]. Наиболее широкое распространение получила модель Бука-Вена (МБВ). Она предложена Р. Буком [2] и обобщена И. Веном [3]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x, z, t) = f(t), \quad (1)$$

$$F(x, z, t) = \alpha kx(t) + (1 - \alpha)kz(t), \quad (2)$$

$$\dot{z} = d^{-1} \left(\alpha \dot{x} - \beta |\dot{x}| |z|^n \operatorname{sign}(z) - \gamma \dot{x} |z|^n \right), \quad (3)$$

где $m > 0$ — масса, $c > 0$ — демпфирование, $F(x, z, t)$ — восстанавливающая сила, $d > 0$, $n > 0$, $k > 0$, $\alpha \in (0, 1)$, $f(t)$ — возбуждающая сила, α, β, γ — некоторые числа. (3) является уравнением Бука-Вена.

Существует множество модификаций МБВ [4]. Каждая модель учитывает особенности рассматриваемой системы. Успешное применение модели Бука-Вена зависит от идентификации ее параметров по экспериментальным данным. Решение нелинейного уравнения (3) является ос-

новной проблемой идентификации МБВ. В [5] применен трехуровневый алгоритм для идентификации модели Бука-Вена. Он основан на регрессионном анализе, методах наименьших квадратов или Гаусса-Ньютона и расширенном фильтре Калмана. Близкий подход применен в [6, 7]. В [8, 9] предложены адаптивные алгоритмы для оценки параметров модели МБВ с эффектом забывания данных [10]. Предполагается, что доступны для измерения $\ddot{x}$ и z , а $\dot{x}$ и x получены путем интегрирования. Подход к адаптивной идентификации, рассмотренный в [11, 12], основан на применении метода наименьших квадратов и корректировке матрица усиления адаптации. Задаются области изменения $\dot{x}$, x и значение параметра n . Анализ других подходов к идентификации параметров МБВ дан в [13, 14, 4, 15]. Следует заметить, что большинство процедур предполагает измерение производных по x . Такая возможность не всегда возможна при решении практических задач.

Известны примеры [16], когда оценки параметра МБВ не совпадают с результатами, полученными для других входных сигналов. Такие примеры говорят о неоднозначности идентификации, которая вызывает неустойчивость модели

относительно входа. Это объясняется тем, что модель Бука-Вена должна быть устойчивой и обеспечивать адекватность физическому процессу [17]. Условия, которым должна удовлетворять модель Бука-Вена, рассмотрены в [17]. К ним относят обеспечение адекватности математической модели физическому процессу и её устойчивость. Условия устойчивости накладывают ограничения на диапазоны изменения параметров модели. Выбор параметров, принадлежащих области устойчивости, не всегда дает адекватную МБВ [15] в условиях неопределенности. Поэтому в [16] предложен подход к идентификации параметров модели (3), основанный на аппроксимации с помощью полинома.

Анализ публикаций показывает, что разработано много алгоритмов и процедур идентификации параметров модели Бук-Вена. Предлагаемые модели учитывают особенности исследуемой системы. Как правило, области изменения параметров МБВ задаются априори. Некоторые параметры, например n , считаются известными. Часто предполагается, что все производные объекта измеряются. Такая ситуация возникает на практике не всегда, что приводит к нереализуемости предлагаемых алгоритмов.

Ниже для решения проблемы устойчивости модели (3) применяется метод адаптивной идентификации, основанный на использовании адаптивных наблюдателей. Он основан на подходе, предложенном в [18]. Рассматривается система, описываемая уравнениями (1)-(3). Предполагается, что измеряются вход $f(t)$ и выход $x(t)$ системы.

Постановка задачи

Рассматривается система S_{BW} , описываемая уравнениями (1)-(3) с выходом $y(t) = x(t)$.

Множество экспериментальных данных имеет вид

$$I_o = \{f(t), y(t), t \in J\}, \quad (4)$$

где $J \subset R$ — заданный интервал времени. Обозначим вектор параметров системы через $A = [m, c, a, k, \alpha, \beta, \gamma, n]^T$.

Задача: разработать для системы S_{BW} такой адаптивный наблюдатель для оценки вектора A , чтобы выполнялось условие

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\hat{y}(t) - y(t)| \leq \pi_y, \quad (5)$$

где $\hat{y} \in R$ — выход адаптивного наблюдателя, $\pi_y \geq 0$.

Замечание 1. Эффективность идентификации системы S_{BW} зависит от свойств входа $f(t)$. Требования к $f(t)$ в задачах идентификации известны. Возбуждающая сила $f(t)$ должна быть постоянно возбуждаемой (ПВ). Это условие является необходимым, но недостаточным [19]. Вход, имеющий свойство ПВ, может не обеспечить идентифицируемость структуры гистерезиса. Структурную идентифицируемость гистерезиса гарантирует вход $f(t)$, имеющий свойство S-стабилизации системы S_{BW} [19]. Это необходимо учитывать при разработке алгоритма оценки параметров уравнения (3). Условия проверки этого свойства для динамической системы приведены в [19].

Синтез системы идентификации

Пусть $d=1$, $a=1$. Подставим $F(x, z, t)$ в (1) и запишем его в виде

$$(s^2 + \bar{a}_1 s + \bar{a}_2)x + \bar{a}_3 z = b f, \quad (6)$$

где $\bar{a}_1 = c/m$, $\bar{a}_2 = \alpha k/m$, $\bar{a}_3 = (1-\alpha)k/m$, $b = m^{-1}$.

Так как множество I_o имеет вид (4), то (6) приведем к идентификационной форме относительно $\dot{x}$. Разделим левую и правую часть (6) на $s + \mu$, где $\mu > 0$ и не совпадает с корнями полинома $s^2 + a_1 s + a_2$. Тогда получим

$$\dot{x} = a_1 x + a_2 p_x + a_3 p_z + b p_f, \quad (7)$$

$$\dot{p}_x = -\mu p_x + x, \dot{p}_f = -\mu p_f + f, \dot{p}_z = -\mu p_z + z, \quad (8)$$

где $a_1 = -(c - \mu m) / m$,

$a_2 = -(\alpha k - \mu(c - \mu m)) / m$, $a_3 = -((1-\alpha)k) / m$.

Уравнения (7), (8) содержат только измеряемые переменные, кроме z . Это усложняет процесс идентификации параметров системы S_{BW} .

Замечание 2. Упрощения $d=1$, $a=1$ не отражаются на структуре представления (7). Учет d, a приводит к увеличению числа оцениваемых параметров.

Применим модель

$$\dot{\hat{x}} = -k_x(\hat{x} - x) + \hat{a}_1 x + \hat{a}_2 p_x + \hat{a}_3 p_z + \hat{b} p_f \quad (9)$$

для оценки параметров уравнения (7), где $k_x > 0$ — заданное число; $\hat{a}_i(t)$, $i=1,2,3$, $\hat{b}(t)$ — настраиваемые параметры модели. Обозначим $e = \hat{x} - x$. Тогда из (7), (9) получаем уравнение для ошибки идентификации

$$\dot{e} = -k_x e + \Delta a_1 x + \Delta a_2 p_x + \Delta a_3 p_z + \Delta b p_f, \quad (10)$$

где $\Delta a_1 = \hat{a}_1(t) - a_1$, $\Delta a_2 = \hat{a}_2(t) - a_2$,
 $\Delta a_3 = \hat{a}_3(t) - a_3$, $\Delta b = \hat{b}(t) - b$.

Уравнение (10) не реализуемо, так как переменная z в (8) неизвестна. Получим текущую оценку для $z(t)$. Рассмотрим модель

$$\dot{\hat{x}}_z = -k_x(\hat{x}_z - x) + \hat{a}_1 x + \hat{a}_2 p_x + \hat{b} p_f. \quad (11)$$

Введем невязку $\varepsilon_z = x - \hat{x}_z$. Будем считать ε_z текущей оценкой z . Применим модель для оценки z

$$\dot{\hat{z}} = -k_z(\hat{z} - \varepsilon_z) + \tilde{x} - \hat{\beta}|\tilde{x}||\hat{z}|^n \operatorname{sign}(\hat{z}) - \hat{\gamma}\tilde{x}|\hat{z}|^n, \quad (12)$$

где $k_z > 0$ — заданное число; $\hat{\beta}$, $\hat{\gamma}$ — оценки параметров гистерезиса (3); $\tilde{x} = (x(t + \tau) - x(t))/\tau$, τ — шаг интегрирования.

Рассмотрим невязку $\varepsilon = \hat{z} - \varepsilon_z$, которая удовлетворяет уравнению

$$\dot{\varepsilon} = -k_z \varepsilon + \Delta \dot{x} + \Delta \beta|\tilde{x}||\hat{z}|^n \operatorname{sign}(\hat{z}) + \beta \eta_\beta + \Delta \gamma \tilde{x}|\hat{z}|^n + \gamma \eta_\gamma, \quad (13)$$

$$\eta_\beta = |\dot{x}||z|^n \operatorname{sign}(z) - |\tilde{x}||\hat{z}|^n \operatorname{sign}(\hat{z}), \quad \eta_\gamma = \dot{x}|z|^n - \tilde{x}|\hat{z}|^n,$$

где $\Delta \dot{x} = \tilde{x} - \dot{x}$, $\Delta \beta = \beta - \hat{\beta}$, $\Delta \gamma = \gamma - \hat{\gamma}$. Тогда (9) представим в виде

$$\dot{\hat{x}} = -k_x(\hat{x} - x) + \hat{a}_1 x + \hat{a}_2 p_x + \hat{a}_3 p_z + \hat{b} p_f, \quad (14)$$

$$\dot{p}_z = -\mu p_z + \hat{z}, \quad (15)$$

а (10) перепишем в виде

$$\dot{e} = -k_x e + \Delta a_1 x + \Delta a_2 p_x + \Delta a_3 p_z + \Delta b p_f. \quad (16)$$

Рассмотрим функцию Ляпунова (ФЛ) $V_e(t) = 0.5e^2(t)$. $\dot{V}_e$ имеет вид

$$\dot{V}_e = -k_x e^2 + e(\Delta a_1 x + \Delta a_2 p_x + \Delta a_3 p_z + \Delta b p_f). \quad (17)$$

Из условия $\dot{V}_e \leq 0$ получаем адаптивные алгоритмы

$$\begin{aligned} \Delta \dot{a}_1 &= -\gamma_1 e x, \quad \Delta \dot{a}_2 = -\gamma_2 e p_x, \\ \Delta \dot{a}_3 &= -\gamma_3 e p_z, \quad \Delta \dot{b} = -\gamma_4 e p_f, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\gamma_i > 0, i = 1, 2, 3$; $\gamma_b > 0$.

Рассмотрим ФЛ $V_e(t) = 0.5e^2(t)$ и для $\dot{V}_e$ получим

$$\begin{aligned} \dot{V}_e &= -k_x e^2 + e(\Delta \dot{x} + \Delta \beta|\tilde{x}||\hat{z}|^n \operatorname{sign}(\hat{z}) + \\ &\quad \beta \eta_\beta + \Delta \gamma \tilde{x}|\hat{z}|^n + \gamma \eta_\gamma). \end{aligned} \quad (19)$$

Тогда получаем алгоритмы

$$\Delta \dot{\beta} = -\chi_\beta e|\tilde{x}||\hat{z}|^n \operatorname{sign}(\hat{z}), \quad \Delta \dot{\gamma} = -\chi_\gamma e \tilde{x}|\hat{z}|^n, \quad (20)$$

где $\chi_\beta > 0, \chi_\gamma > 0$ — параметры, обеспечивающие (20) сходимость алгоритмов.

Для оценки показателя n в (12) можно применить несколько алгоритмов. Эффективность их работы зависит от ряда факторов. Простейший алгоритм имеет вид (он следует из (19))

$$\dot{n} = \begin{cases} -\gamma_n \varepsilon \hat{\beta}|\hat{z}|^{n-1} \hat{z} \tilde{x}, & \text{если } \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \right| \in [v_0, v_1], \\ 0, & \text{если } \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \right| \notin [v_0, v_1], \end{cases} \quad (21)$$

где v_0, v_1 — заданные положительные числа, $\gamma_n > 0$.

Итак, система адаптивной идентификации S_{BW} -системы описывается уравнениями (8), (15), (20), (16), (18), (20), (21). Обозначим эту систему через AS_{BW} . Рассмотрим ее свойства.

Свойства адаптивной системы

Рассмотрим подсистему AS_X , описываемую уравнениями (21), (23). Пусть

$$\Delta K(t) = [\Delta a_1(t), \Delta a_2(t), \Delta a_3(t), \Delta b(t)]^T,$$

$$\Gamma = \operatorname{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_b).$$

$$V_K(t) = 0.5 \Delta K^T(t) \Gamma^{-1} \Delta K(t), \quad (22)$$

$$V(t) = V_e(t) + V_K(t). \quad (23)$$

Предположение 1. Вход $f(t)$ системы (1)-(3) является предельно невырожденным и ограниченным.

Теорема 1. Пусть: 1) функции (22) и $V_e(t) = 0.5e^2(t)$ являются положительно определенными и удовлетворяют условиям $\inf_{|e| \rightarrow \infty} V_e(e) \rightarrow \infty$, $\inf_{\|\Delta K\| \rightarrow \infty} V_K(\Delta K) \rightarrow \infty$; 2) для системы (1)-(3) выполняется предположение 1. Тогда все траектории системы AS_X ограничены, лежат в области $G_t = \{(e, \Delta K) : V(t) \leq V(t_0)\}$ и справедлива оценка

$$\int_{t_0}^t 2k_x V_e(\tau) d\tau \leq V(t_0) - V(t).$$

Доказательство теоремы 1. Рассмотрим функцию Ляпунова $V(t)$ (23). $\dot{V}(t)$ на движениях AS_X -системы имеет вид

$$\dot{V} = -k_x e^2 + \dot{V}_K - \dot{V}_K \leq -2k_x V_e.$$

Применим условие 1) теоремы 1. Так как $\dot{V}(t) \leq 0$, то AS_X -система является устойчивой. Проинтегрируем $\dot{V}(t)$ по времени и получим

$$V(t_0) - 2k_x \int_{t_0}^t V_e(\tau) d\tau \geq V(t). \quad (24)$$

Так как $V(e, \Delta K)$ удовлетворяет условию 1) теоремы 1, то все траектории системы AS_X лежат в области $G_t = \{(e, \Delta K) : V(t) \leq V(t_0)\}$. Из (24) следует искомая оценка для AS_X -системы.

Теорема 1 показывает, что все траектории адаптивной системы AS_X ограничены. Обеспечение асимптотической устойчивости системы требует наложения более жестких условий на систему.

Пусть $P(t) \triangleq [x(t) \ p_x(t) \ p_z(t) \ p_f(t)]^T$.

Определение 1. Вектор $P \in R^4$ является постоянно возбуждаемым с уровнем ν или имеет свойство $\mathcal{PE}_\nu$, если

$$\mathcal{PE}_\nu : P(t)P^T(t) \geq \nu I_4$$

справедливо для $\exists \nu > 0$ и $\forall t \geq t_0$ на некотором интервале $T > 0$, где $I_4 \in R^4$ — единичная матрица.

Если вектор $P(t)$ имеет свойство $\mathcal{PE}_\nu$, то будем писать $P(t) \in \mathcal{PE}_\nu$.

Пусть $P(t) \in \mathcal{PE}_\nu$. Тогда можно показать, что AS_X -система является экспоненциально устойчивой. Этот результат следует из теоремы 5 [21] и теории M -матриц [22].

Ограниченность траекторий подсистемы (13), (20) доказывается аналогично теореме 1. Для нее справедлива оценка

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^t (k_z - \nu(\beta + \gamma)g_1)V_e(\tau) d\tau + \\ & + \frac{1}{2(k_z - \nu(\beta + \gamma)g_1)(t - t_0)} (\delta_\Delta)^2 \leq, \quad (25) \\ & V_{e\beta\gamma}(t_0) - V_{e\beta\gamma}(t) \end{aligned}$$

где $|\Delta \dot{x}| \leq \delta_\Delta$, $\delta_\Delta \geq 0$, $|\dot{x}| \leq \nu$, $\nu > 0$, g_1 — некоторое положительное число. Для выполнения оценки необходимо, чтобы $k_z > \nu(\beta + \gamma)g_1$.

Из (25) следует, что качество процессов в подсистеме (13), (20) зависит от величины производной выхода x .

Пример

Рассмотрите систему (1)–(5) с параметрами $n=1.5$, $c=2$, $m=1$, $\beta=0.5$, $\alpha=0.7$, $k=0.6$. Пусть $d=a=1$. Возбуждающая сила $f(t) = 2 - 2\sin(0.15\pi t)$. Система S_{BW} моделирова-

лась с начальными условиями: $x(0)=1$, $\dot{x}(0)=0$, $z(0)=1$. Сформировано множество I_o (4). Фазовый портрет системы и выход гистерезиса показаны на рис. 1.

Применение подхода [19] показало, что система является структурно идентифицируемой, т.е. при данном входе можно оценить параметры системы. Выбор параметра μ в (8) осуществлялся на основе вычисления характеристических показателей Ляпунова [20], $\mu=0.8$. Начальные условия в (8) равны нулю.

Результаты настройки параметров модели (14) показаны на рис. 1, 2.

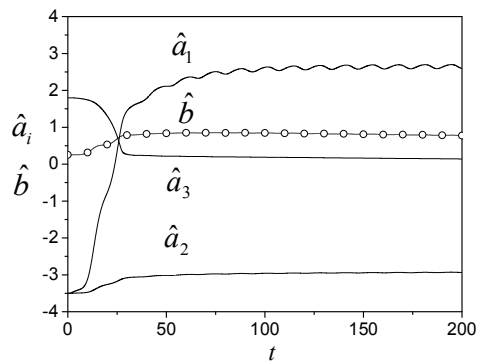


Рис. 1. Настройка параметров модели (14)

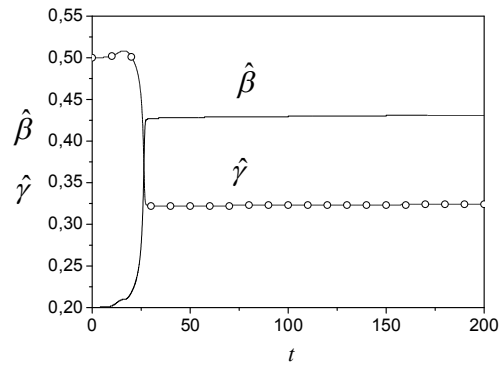


Рис. 2. Настройка параметров модели (12)

Изменение ошибок идентификации e, ε представлено на рис. 3. Результаты моделирования показывают, что точность получаемых оценок зависит от числа настраиваемых параметров и уровня производной выходного сигнала x , а также от свойств $f(t)$. Полученные результаты подтверждают выше сделанные утверждения. Результаты работы подсистемы (13), (20) влияют на процессы настройки в AS_X -системе. Коэффициенты усиления в (18), (20) равны: $\gamma_1 = 0.0002$, $\gamma_2 = 0.00001$, $\gamma_3 = 0.00002$, $\gamma_4 = 0.00005$,

$$\chi_\beta = 0.0000002, \chi_\gamma = 0.0000002.$$

Параметр n в (12) равен 1.5.

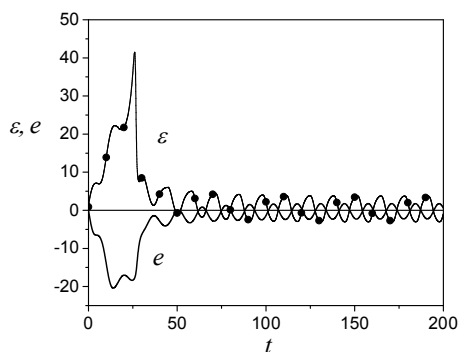


Рис. 3. Изменение ошибок e, ε

Замечание 3. Результаты моделирования системы (1)-(3) показали, что алгоритм (21) является чувствительным к возмущениям. Он увеличивает время адаптации и требует дальнейшего изучения. Как вариант, можно задать априори область изменения n в (12) и вычислить ошибку ε для каждого из кандидатов. Затем положить $n = \hat{n}$, если $|\varepsilon(t)| \leq \tilde{\delta}$, где $\tilde{\delta} > 0$ — некоторая заданная величина.

Процесс восстановления выхода гистерезиса представлен на рис. 4. Были определены коэффициенты детерминации (КД) $r_{xz} = 0.864$ для эталонного гистерезиса и полученного (рис. 4) $r_{\hat{x}\hat{z}} = 0.764$ между (x, z) и $(\hat{x}, \hat{z})$. Сравнение КД подтверждает эффективность предложенного подхода. Некоторое расхождение значений объясняется процессом настройки параметров моделей.

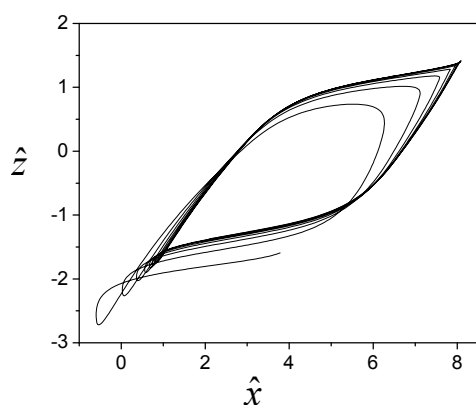


Рис. 4. Восстановление гистерезиса в процессе настройки параметров

Итак, результаты моделирования подтверждают ограниченность траекторий разработанной системы. Учитывая, что большинство методов основано на концепции «черного ящика», изложенный подход позволяет получить оценки

параметров гистерезиса и снять проблему моделирования уравнения (3).

Заключение

Разработан метод адаптивной идентификации параметров для системы с гистерезисом Бука-Вена. Метод основан на применении адаптивных наблюдателей и снимает проблему устойчивости системы идентификации. Получены адаптивные алгоритмы подстройки параметров моделей, и показана ограниченность траекторий в адаптивной системе. Определена текущая оценка неопределенности, которая используется для настройки параметров модели гистерезиса.

Литература

1. Красносельский М.А., Покровский А.В. Системы с гистерезисом. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 272 с.
2. Bouc R. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis // In: Proceedings of fourth conference on non-linear oscillation. Prague. 1967.
3. Wen Y.K. Method for random vibration of hysteretic systems // J Eng. Mech. Div. 1976. V. 102(2). Pp. 249–263.
4. Ismail M. The Hysteresis Bouc-Wen Model, a Survey // Arch Comput Methods Eng. 2009. Vol. 16. Pp. 161–188.
5. Loh C.H., Chung S.T. A three-stage identification approach for hysteretic systems // Earthquake Eng Struct Dyn. 1993. Vol. 22. Pp. 129–150.
6. Baber T.T., Wen Y.K. Random vibration of hysteretic degrading systems // J. Eng Mech. 1981. Vol. 107(6). Pp. 1069–1087.
7. Kunnath S.K., Mander B., Fang L. Parameter identification for degrading and pinched hysteretic structural concrete systems // Eng. Struct. 1997. Vol. 19(3). Pp. 224–232.
8. Online identification of hysteretic systems / A.G. Chassiakos, S.F. Masri, A.W. Smyth, T.K. Caughey // J. Appl. Mech. 1998. Vol. 65. Pp. 194–203.
9. Online parametric identification of MDOF nonlinear hysteretic systems / A.W. Smith, S.F. Masri, A.G. Chassiakos, T.K. Caughey // J. Eng. Mech. 1999. Vol. 125(2). Pp. 133–142.
10. Ioannou P.A. Robust adaptive control. New York: Sun – Prentice Hall, 1996. 821 p.
11. On-line Identification of Nonlinear Hysteretic Structural Systems Using A Variable Trace Approach / Lin J.W., Betti R., Smyth A.W., Longman R.W. // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2001. Vol. 30. Pp. 1279–1303.
12. Shih M., Sung W., Go C. Investigation of newly developed added damping and stiffness device with low yield strength steel // J. Zhejiang Univ Sci. 2004. Vol. 5(3). Pp. 326–334.
13. Charalampakis A.E., Dimou C.K. Identification of Bouc-Wen hysteretic systems using particle swarm optimization // Computers and Structures. 2010. Vol. 88 (21–22). Pp. 1197–1205.
14. Ikhouane F., Rodellar J. Systems with hysteresis: analysis, identification and control using the Bouc-Wen model. John Wiley & Sons Ltd, 2007. 202 p.
15. Talatahari S., Kaveh A., Rahbari M. Parameter identification of Bouc-Wen model for MR fluid dampers using adaptive charged system search optimization // Journal of Mechanical Science and Technology. 2012. V. 26 (8). Pp. 2523–2534.

16. О модификации модели Бук–Вена для описания гистерезиса нестационарных процессов / А.Н. Данилин, Е.Л. Кузнецова, Н.Н. Курдюмов, Л.Н. Рабинский, С.С. Тарасов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 4. С. 187–199.

17. Ismail M., Ikhouane F., Rodellar J. The hysteresis Bouc-Wen model, a survey // Archives of Computational Methods in Engineering. 2009. Vol. 16. P. 161–188, available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11831-009-9031-8> (accessed 18 July 2016).

18. Karabutov N. Adaptive identification of uncertain dynamic systems // Advances in Engineering Research. 2019. Volume 28. New York: Nova Science Publisher. Pp. 87–171.

19. Karabutov N. About structural identifiability of nonlinear dynamic systems under uncertainty // Global Journal of Science Frontier Research: (A) Physics and Space Science. 2018. Vol. 18. Is. 11. Pp. 51–61.

20. Karabutov N. Structural methods of estimation Lyapunov exponents linear dynamic system // International journal of intelligent systems and applications. 2015. Vol. 7. No. 10. Pp. 1–12.

21. Karabutov N. Structural-parametrical design method of adaptive observers for nonlinear system // International journal of intelligent systems and applications. 2018. Vol. 10. No 2. Pp. 1–16.

22. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 560 с.

Поступила 07.11.2019; принята к публикации 13.12.2019

Информация об авторах

Карабутов Николай Николаевич – д-р техн. наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78), e-mail: kn22@yandex.ru

Шмырин Анатолий Михайлович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: amsh@lipetsk.ru

APPLICATION OF ADAPTIVE OBSERVERS FOR SYSTEM IDENTIFICATION WITH BOUC-WEN HYSTERESIS

N.N. Karabutov¹, A.M. Shmyrin²

¹MIREA-Russian Technological University, Voronezh, Russia

²Lipetsk State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a method for adaptive identification of a system with Buck-Vienna hysteresis is proposed. It is based on the use of adaptive observers. This approach allows us to remove the stability problem of solving the hysteresis equation. It is shown that the input properties significantly affect the solution of the identification problem. A non-linear system with Buck-Vienna hysteresis should be structurally identifiable. It is shown that in order to fulfill the conditions of structural identifiability of the system, the input must be S-synchronizing. A selection of adaptive observer parameters is proposed. Adaptive algorithms for identifying processes in an adaptive system are synthesized. To obtain them, the second Lyapunov method was applied. Two subsystems are identified whose analysis of properties simplifies the analysis of system stability. The limited processes in subsystems of an adaptive system are shown. The accuracy of the estimates obtained depends on the value of the derivative of the output variable. A method is proposed for determining the current estimate of uncertainty in an adaptive system. The resulting uncertainty is the current benchmark for evaluating the hysteresis output. It is used to synthesize algorithms for tuning the parameters of the Buck-Vienna model. To identify the Buck-Vienna hysteresis, an adaptive model is used, which coincides with the equation of the adaptive observer. The simulation results are presented that confirm the operability of the proposed approach

Key words: hysteresis, Bouc-Wen model, adaptive observer, uncertainty

Acknowledgments: the study was carried out with financial support from the Russian Federal Property Fund and the Lipetsk Region as part of the scientific project 19-48-480007 p_a

References

1. Krasnosel'skiy M.A., Pokrovskiy A.V., "Systems with Hysteresis" ("Sistemy s gisterezisom"), Moscow, Nauka, 1989, 253 p.
2. Bouc R. "Forced vibrations of a mechanical system with hysteresis," *Proc. of the Fourth Conference on Nonlinear Oscillations*, Prague, Czechoslovakia, 1967, pp. 315–321.
3. Wen Y.K. "Method for random vibration of hysteretic systems", *J. Eng. Mech. Div.*, 1976, vol. 102, no. 2, pp. 249–263.
4. Ismail M., "The hysteresis Bouc-Wen model, a survey", *Arch Comput Methods Eng.*, 2009, vol. 16, pp. 161–188.
5. Loh C.H., Chung S.T., "A three-stage identification approach for hysteretic systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1993, vol. 22, pp. 129–150.
6. Baber T.T., Wen Y.K., "Random vibration of hysteretic degrading systems," *Journal of Engineering Mechanics*, 1981, vol. 107, no. 6, pp. 1069–1087.
7. Kunnath S.K., Mander J.B., Fang L. "Parameter identification for degrading and pinched hysteretic structural concrete systems", *Engineering Structures*, 1997, vol. 19, no.3, pp. 224–232.

8. Chassiakos G., Masri S.F., Smyth A.W., Caughey T.K., "Online identification of hysteretic systems," *J. Appl. Mech.*, 1998, vol. 65, pp. 194–203.
9. Smith A.W., Masri S.F., Chassiakos A.G., Caughey T.K. "Online parametric identification of MDOF nonlinear hysteretic systems", *Journal of Engineering Mechanics*, 1999, vol. 125, no. 2, pp. 133–142.
10. Ioannou P.A., Sun J., "Robust adaptive control", New York: Prentice Hall, 1996, 821 p.
11. Lin J.W., Betti R., Smyth A.W., Longman R.W. "On-line identification of nonlinear hysteretic structural systems using a variable trace approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001, vol. 30, pp. 1279-1303.
12. Shih M., Sung W., Go C., "Investigation of newly developed added damping and stiffness device with low yield strength steel", *J. Zhejiang Univ. Sci.*, 2004, vol. 5, no. 3, pp. 326–334.
13. Charalampakis A.E., Dimou C.K., "Identification of Bouc-Wen hysteretic systems using particle swarm optimization," *Computers and Structures*, 2010, vol. 88, no. 21-22, pp. 1197-1205.
14. Ikhouane F., Rodellar J., "Systems with hysteresis: analysis, identification and control using the Bouc-Wen model", John Wiley & Sons Ltd, 2007, 202 p.
15. Talatahari S., Kaveh A., Rahbari N.M. "Parameter identification of Bouc-Wen model for MR fluid dampers using adaptive charged system search optimization", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, vol. 26, no. 8, pp. 2523-2534.
16. Danilin A.N., Kuznetsova E.L., Kurdumov N.N., Rabinsky L.N., Tarasov S.S., "A modified Bouc-Wen model to describe the hysteresis of non-stationary processes," *PNRPU Mechanics Bulletin (Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta)*, 2016, no. 4, pp. 187-199.
17. Ismail M., Ikhouane F., Rodellar J., "The hysteresis Bouc-Wen model, a survey", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2009, vol. 16, pp. 161–188.
18. Karabutov N. "Adaptive identification of uncertain dynamic systems", *Advances in Engineering Research*, vol. 28, New York: Nova Science Publisher, 2019, pp. 87-171.
19. Karabutov N. "About structural identifiability of nonlinear dynamic systems under uncertainty", *Global Journal of Science Frontier Research: (A) Physics and Space Science*, 2018, vol. 18, is. 11, pp. 51-61.
20. Karabutov N. "Structural Methods of estimation Lyapunov exponents linear dynamic system", *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2015, vol. 7, no. 10, pp. 1-12.
21. Karabutov N. "Structural-parametrical design method of adaptive observers for nonlinear systems", *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 1-16.
22. Gantmacher F.R., "The theory of matrices" ("Teoriya matrits"), Moscow: FIZMATLIT, 2004, 560 p.

Submitted 07.11.2019; revised 13.12.2019

Information about the authors

Nikolay N. Karabutov, Dr. Sc. (Technical), Professor, MIREA-Russian Technological University (78 Vernadskogo avenue, Moscow 119454, Russia), e-mail: kn22@yandex.ru

Anatoliy M. Shmyrin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya st., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: amsh@lipetsk.ru

**АЛГОРИТМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭРГАТИЧЕСКИМ ЭЛЕМЕНТОМ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ****С.П. Полуэктов¹, В.С. Струков¹, А.А. Копылов¹, М.В. Себелев¹, В.Л. Бурковский²****¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия****²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: обоснована актуальность проблемы обеспечения безопасности функционирования производственных систем. Представлено одно из возможных направлений решения данной проблемы применительно к подвижной производственной системе с эргатическим элементом. Аргументированы предпосылки к усилению собственных защитных свойств производственной системы с эргатическим элементом путем оснащения ее комплексными системами безопасности функционирования, реализующими управление по опасности и обеспечивающими выполнение основных функций с минимальной вероятностью гибели системы. Изложены основания для разработки способа предупреждения внезапной утраты человеком-оператором работоспособного состояния при работе системы в экстремальных условиях. Приведены аргументы в пользу введения в вектор состояния дополнительного параметра – скорости изменения давления воздуха в герметической кабине объекта, который позволит определить косвенным путем вид разгерметизации на ранней стадии развития особой ситуации и сформировать соответствующие параметры управления для предотвращения перехода особой ситуации из аварийной в катастрофическую. Представлен алгоритм определения момента возникновения особой ситуации в производственной системе с эргатическим элементом, вызванной аварийной либо взрывной разгерметизацией, путем дополнительного измерения скорости изменения давления воздуха в герметической кабине объекта, а также комплекс действий, исключающих потерю человеком-оператором работоспособности на начальном этапе развития особой ситуации

Ключевые слова: производственная система, эргатический элемент, человек-оператор, герметическая кабина, разгерметизация, гипоксия, абсолютное давление воздуха, скорость изменения давления воздуха

Введение

Особенностью подвижной производственной системы с эргатическим элементом является то, что человек-оператор в процессе управления рассматриваемой системой перемещается вместе с ней в пространстве и испытывает на себе физические воздействия, связанные с этим перемещением и изменением состояния окружающей среды. При этом взаимодействие человека-оператора с объектом управления происходит не только через информационную модель, но и непосредственно через восприятие неинструментальных сигналов о состоянии объекта управления.

Активное применение средств автоматизации в сложных производственных системах гарантированно приводит к снижению активности человека-оператора, что недопустимо в рамках решения им основной задачи автоматизированного движения – резервирование автоматизированного движения в нештатной ситуации ее функционирования. При любой степени автоматизации производственной системы ответственным за ре-

зультат ее функционирования всегда остается человек-оператор [1, 2].

Следовательно, сохранение активности человека-оператора является одним из приоритетных направлений развития производственных систем с эргатическим элементом, которое непосредственно связано с проблемой обеспечения их безопасности функционирования.

Постановка задачи

Особенно ярко вопрос обеспечения безопасности функционирования производственных систем проявляется в авиации, поскольку авиационные происшествия приводят к существенным материальным потерям и человеческим жертвам, приносят значительный моральный ущерб, а также способствуют снижению конкурентоспособности авиационной техники и торможению развития авиации [3]. Безопасность полетов авиационных систем определяется как комплексная характеристика воздушных судов и работ на авиационной технике, определяющая способность выполнять полеты без угрозы для жизни людей. Она характеризуется уровнем безопасности полетов, который определяется вероятностью события, при кото-

ром в полете не возникает такая особая ситуация, как катастрофическая. В данном случае под особой ситуацией понимается нештатная ситуация, возникающая в полете в результате воздействия неблагоприятных факторов и приводящая к снижению уровня безопасности полета. Кроме катастрофической ситуации по степени опасности выделяют еще усложнение условий полета, сложную и аварийную ситуации [1]. Таким образом, основной задачей человека-оператора и бортового оборудования авиационной производственной системы является предотвращение перехода особой ситуации в катастрофическую.

Рассмотрим уровень опасности функционирования производственной системы с эргатическим элементом с точки зрения системного подхода. В этом случае его можно оценить вероятностью $P_A(t)$ возникновения в полете авиационного происшествия (катастрофической или аварийной ситуации) при нарушении функционирования отдельных элементов системы [1]

$$P_A(t) = P_{ВФ}(t)P_{ОС}(ОС / ВФ)P_{КС}(КС / ОС),$$

где $P_{ВФ}(t)$ – вероятность появления воздействующих факторов (ВФ), влияющих на безопасность функционирования системы; $P_{ОС}(ОС / ВФ)$ – условная вероятность непарирования особой ситуации (ОС) бортовыми автоматизированными системами или человеком-оператором; $P_{КС}(КС / ОС)$ – условная вероятность перехода особой ситуации в катастрофическую (КС), обусловленной непарированием бортовыми автоматизированными системами или человеком-оператором ВФ в возникшей особой ситуации.

Следовательно, основные усилия по решению проблемы обеспечения безопасности функционирования эргатической системы должны быть направлены на уменьшение условных вероятностей $P_{ОС}(ОС / ВФ)$ и $P_{КС}(КС / ОС)$.

Одним из перспективных способов решения проблемы безопасности функционирования производственной системы является повышение уровня собственных защитных свойств всей системы в целом путем оснащения ее специальными техническими системами, позволяющими своевременно обнаруживать возникновение и нарастание опасности на борту, а также активно противодействовать возникновению авиационного происшествия [4]. Для защиты

экипажей современных воздушных судов от влияния неблагоприятных факторов полета на организм человека используют целый комплекс технических средств, которые обеспечивают требуемое функциональное состояние членов экипажей на всех режимах полета. К таким средствам относятся герметические кабины, системы кондиционирования воздуха, системы кислородного питания, индивидуальное защитное снаряжение экипажей и системы аварийного покидания воздушного судна. Однако в случае нештатной работы указанных средств экипаж в высотном полете попадает в условия жесточайшего комплексного воздействия на его организм таких атмосферных факторов, как пониженные барометрическое давление, температура и влажность воздуха, а также высокая солнечная радиация. Наиболее опасным осложнением высотного полета является разгерметизация кабины, при котором экипаж может подвергаться не только выраженному кислородному голоданию (гипоксии), но и большим по величине и скорости изменения барометрическим давлениям (гипобарии и декомпрессии) [5]. Возможности организма человека противостоять этим факторам весьма ограничены, поэтому становится актуальной задача разработки способа предупреждения внезапной утраты летчиком работоспособного состояния при возникновении на борту воздушного судна особой ситуации, вызванной разгерметизацией кабины самолета в условиях высотного полета.

Методы исследования

Проблему обеспечения безопасности отдельного полета воздушного судна предлагается решать путем введения в состав бортового оборудования каждого летательного аппарата комплексной системы безопасности полета (КСБП), реализующей управление по уровню опасности и обеспечивающей решение любой поставленной задачи с минимизацией вероятности гибели системы [4]. В этом случае подвижная производственная система с эргатическим элементом приобретает активные защитные свойства, характеризующие способность человека-оператора совместно с бортовой КСБП оценивать опасность полетной ситуации и активно предотвращать возникновение авиационного происшествия в процессе функционирования.

Под опасностью полетной ситуации понимается возможность (вероятность) гибели си-

стемы в процессе достижения цели полетного задания.

В рамках решения поставленной научной задачи объектом исследования является производственная система с эргатическим элементом в процессе выполнения высотного полета, а предметом исследования – активные защитные свойства рассматриваемой системы по устранению особой ситуации.

Результаты

Отдельный режим функционирования объекта управления определяется многокомпонентным вектором состояния [1]

$$X(t) = f(x_1, \dots, x_i, x_n; U_1, \dots, U_j, U_m; W_1, \dots, W_l, W_k; t),$$

где $x_i(t)$ – фазовые координаты, $U_j(t)$ – параметры управления, $W_l(t)$ – характеристики действующих возмущений, t – время.

В общем случае вектор состояния $X(t)$ является стохастическим и поэтому при приближении к границам эксплуатационной области необходима дополнительная количественная информация об изменении состояния системы и соответствующем ему изменении уровня опасности. Рассматриваемая информация очень важна для идентификации возникающих особых ситуаций, вид которых характеризуется как предельно допустимыми значениями параметров, так и их сочетанием и соотношением в зависимости от условий и режима работы.

Для высотного полета в качестве фазовых координат $x_i(t)$, характеризующих исправность герметической кабины и состояния человека-оператора, традиционно принимаются такие параметры, как массовое количество воздуха в герметической кабине $G_{ГК}$, абсолютное давление воздуха в герметической кабине $P_{ГК}$, перепад давлений (между абсолютным давлением воздуха в герметической кабине и в атмосфере) $\Delta P_{ГК}$, температура воздуха в кабине $T_{ГК}$, процентное содержание кислорода в дыхательной смеси α_{O_2} , парциальное давление кислорода во вдыхаемом воздухе P'_{O_2} и т.д. Однако, несмотря на достаточно широкий комплекс указанных параметров и многообразие оригинальных подходов к решению рассматриваемой научной задачи [1-6], по-прежнему остается открытым вопрос своевременного обнаружения и предупреждения особой ситуации в экстремальных

условиях, вызванных различными видами разгерметизации при выполнении высотного полета. По мнению авторов статьи, это связано с недостаточной информативностью представленных выше параметров для осуществления прогноза вектора состояния $X(t)$.

В рамках решаемой научной задачи особую важность из вышеуказанных фазовых координат вектора состояния $X(t)$ приобретает абсолютное давление воздуха в герметической кабине (ГК) воздушного судна. Величина этого параметра определяется высотой полета, а скорость его изменения – вертикальной скоростью полета. Требуемый закон изменения давления воздуха в герметической кабине $P_{ГК}$ воздушного судна обеспечивается системами автоматического регулирования давления (САРД). Объектом регулирования для системы САРД является масса воздуха в герметической кабине [7]. Схематически объект регулирования САРД представлен на рис. 1.

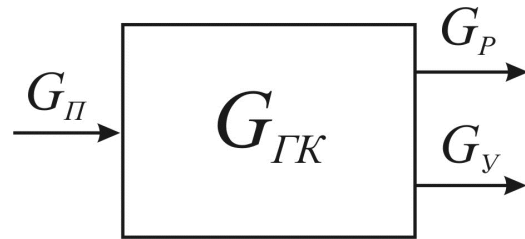


Рис. 1. Схема ГК как объекта регулирования по давлению воздуха

На рис. 1 имеют место следующие обозначения: $G_{П}$ – масса воздуха, подаваемого в ГК; $G_{ГК}$ – масса воздуха в ГК; G_{P} – масса воздуха, перепускаемого из ГК в атмосферу через клапан регулятора САРД; G_{Y} – масса воздуха, вытекающего из ГК через неплотности (утечка воздуха).

В ГК вентиляционного типа (самый распространенный тип кабин современных воздушных судов) на входе в кабину устанавливается регулятор расхода воздуха, а давление воздуха в кабине регулируется за счет перепуска воздуха в атмосферу с помощью регулятора давления, установленного на выходе из ГК.

В переходном режиме работы изменение массы воздуха в ГК характеризуется уравнением

$$\frac{dG_{ГК}}{dt} = G_{П} - G_{P} - G_{Y}.$$

Если выразить массу воздуха в ГК на основании уравнения состояния газов через объем кабины $V_{ГК}$ и давление $P_{ГК}$, то получим уравнение ГК как объекта регулирования по давлению в следующем виде [7]

$$\frac{V_{ГК}}{RT_{ГК}} \frac{d\Delta P_{ГК}}{dt} + \left(\frac{\partial G_P}{\partial P_{ГК}} + \frac{\partial G_Y}{\partial P_{ГК}} - \frac{\partial G_{П}}{\partial P_{ГК}} \right) \Delta P_{ГК} = \\ = \frac{\partial G_{П}}{\partial S_{П}} \Delta S_{П} - \frac{\partial G_P}{\partial S_P} \Delta S_P - \frac{\partial G_Y}{\partial S_Y} \Delta S_Y + f(t),$$

где R – газовая постоянная воздуха, $T_{ГК}$ – температура воздуха в ГК, $S_{П}$ – площадь открытия клапана регулятора расхода воздуха, S_P – площадь открытия клапана регулятора давления воздуха, S_Y – суммарная площадь проходного сечения утечки воздуха, $f(t)$ – переходная функция, характеризующая зависимость параметров ГК от входных величин и прежнего состояния.

При исследовании штатных режимов работы САРД элементами уравнения ГК, характеризующих утечку воздуха из ГК, справедливо пренебрегают, но в случае разгерметизации в высотном полете рассматриваемые составляющие достигают значительных величин и их необходимо учитывать. Однако в реальном высотном полете определить суммарную площадь проходного сечения утечки воздуха из ГК прямым методом измерения не представляется возможным.

Поэтому авторами предлагается включить в имеющийся вектор состояния $X(t)$ для режима высотного полета дополнительный параметр – скорость изменения давления воздуха в герметической кабине $\frac{dP_{ГК}}{dt}$ [8]. Данный параметр позволит определить косвенным путем массу воздуха утечки и установить вид разгерметизации [9] – аварийная или взрывная – на ранней стадии развития особой ситуации, а также сформировать соответствующие параметры управления $U_j(t)$ для предотвращения перехода особой ситуации из аварийной в катастрофическую.

Ключевым моментом в определении вида разгерметизации является проверка следующего условия

$$\frac{dP_{ГК1}}{dt} < \frac{dP_{ГК}}{dt} \leq \frac{dP_{ГК2}}{dt}, \quad (1)$$

где $\frac{dP_{ГК}}{dt}$ – скорость изменения давления

воздуха в герметической кабине, $\frac{dP_{ГК1}}{dt}$, $\frac{dP_{ГК2}}{dt}$

– заданные значения скорости изменения давления воздуха в герметической кабине для аварийной и взрывной разгерметизации соответственно.

Если условие (1) выполняется, то формируют сигнал об аварийной разгерметизации, а если скорость изменения давления воздуха в ГК выше $\frac{dP_{ГК2}}{dt}$, то формируют сигнал о возникновении взрывной разгерметизации кабины.

Указанные выводы основаны на физиологических нормах для экипажей воздушных судов. Например, в соответствии с источником [7] скорость изменения давления воздуха в кабине не должна превышать при непродолжительных полетах 10 мм рт. ст./с, а при продолжительных полетах – 2 мм рт. ст./с. Превышение текущего значения рассматриваемого параметра указанной величины свидетельствует об аварийной разгерметизации кабины [9]. Поэтому целесообразно определить левую границу проверяемого условия $\frac{dP_{ГК1}}{dt}$ равной 10 мм рт. ст./с для непродолжительных полетов и 2 мм рт. ст./с – для продолжительных полетов.

Правую границу $\frac{dP_{ГК2}}{dt}$ условия, свидетельствующую о наличии взрывной разгерметизации [9], необходимо определить на основании результатов имитационного моделирования и принять равной пятикратному превышению допустимого значения $\frac{dP_{ГК1}}{dt}$ для аварийной разгерметизации. Таким образом, правую границу $\frac{dP_{ГК2}}{dt}$ рассматриваемого условия предлагается установить равной 50 мм рт. ст./с для непродолжительных полетов и 10 мм рт. ст./с – для продолжительных полетов.

После определения вида разгерметизации предлагается сформировать соответствующие параметры управления $U_j(t)$ для предотвращения перехода особой ситуации из аварийной в катастрофическую.

Параметры управления $U_j(t)$ должны вытекать из соответствующих управляющих воздействий на объект управления, которые позволят активно противодействовать возникновению

авиационного происшествия. Исходя из условия разгерметизации в высотном полете необходимо предотвратить опасное воздействие декомпрессии на организм человека. Поэтому к первоочередным управляющим воздействиям при разгерметизации традиционно относят [5-7]: искусственное увеличение времени декомпрессии путем подачи в ГК резервного воздуха; ограничение величины избыточного давления воздуха в легких человека; повышение окружающего абсолютного давления воздуха путем своевременного снижения на безопасную высоту полета; сохранение требуемой величины парциального давления кислорода в легких человека путем подачи на дыхание 100-процентного кислорода. В качестве дополнительных мер активного спасения экипажа при высотной разгерметизации авторами предлагается также предусмотреть автоматическое опускание светофильтра защитного шлема летчика в нижнее положение с целью защиты лица летчика от скоростного напора воздуха, осколков остекления фонаря ГК и средств поражения противника.

Таким образом, алгоритм устранения особой ситуации при разгерметизации ГК самолета может быть представлен в виде алгоритма, блок-схема которого представлена на рис. 2, где обозначено: 1 – начало; 2 – блок исходных данных; 3 – блок измерителей параметров физиологического состояния; 4 – блок измерителей параметров герметической кабины; 5 – блок выявления неадекватных действий летчика; 6 – блок определения разгерметизации кабины; 7 – блок формирования сигнала аварийной разгерметизации; 8 – блок формирования сигнала взрывной разгерметизации; 9 – блок формирования сигнала увеличения массовой подачи воздуха в герметическую кабину; 10 – блок формирования сигнала опускания светофильтра защитного шлема летчика; 11 – блок формирования сигнала аварийной подачи 100-процентного кислорода; 12 – блок отправки сообщения руководителю полетов о разгерметизации кабины; 13 – блок формирования сигнала автоматического снижения самолета на безопасную высоту; 14 – блок формирования сигнала перевода самолета в горизонтальную плоскость; 15 – блок формирования сигнала ручного режима управления самолетом; 16 – блок определения располагаемых дальности и времени полета; 17 – блок выбора аэродрома посадки; 18 – блок выработки управляющей информации; 19 – блок ввода управляющей информации в автоматический контур управле-

ния самолетом; 20 – блок формирования сигнала автоматического режима управления полетом самолета; 21 – блок проверки условия (1); 22 – блок проверки условия $P_{ГК} \geq P_{ГК1}$; 23 – блок проверки условия $P_{ГК} = P_{ГК2}$; 24 – блок проверки условия адекватности действий летчика; А – результат проверки условия (1), при котором скорость изменения давления воздуха в кабине не превышает его левую границу, то есть $\frac{dP_{ГК}}{dt} \leq \frac{dP_{ГК1}}{dt}$; Б – результат проверки условия (1), при котором скорость изменения давления воздуха в кабине превышает его правую границу (рис. 2).

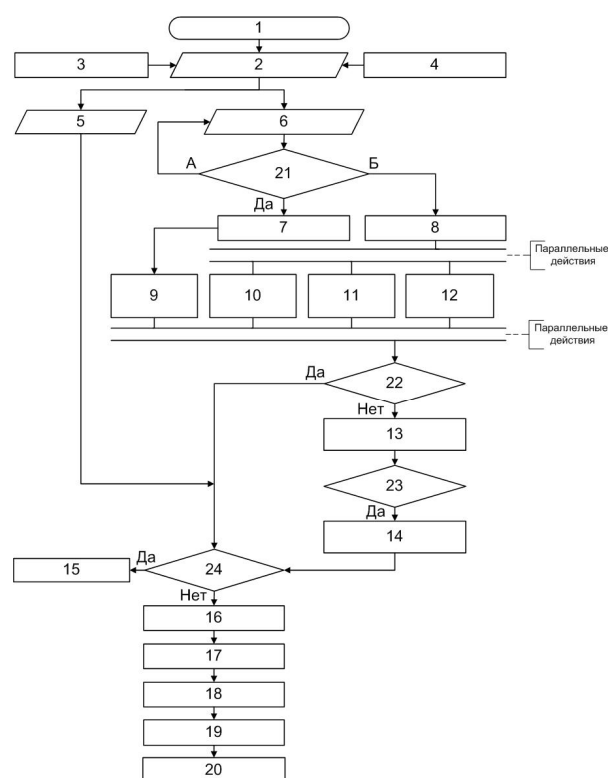


Рис. 2. Блок-схема алгоритма

Блок определения разгерметизации кабины 6 предназначен для определения аварийной либо взрывной разгерметизации. Определение вида разгерметизации осуществляется по условию (1).

Блок формирования сигнала увеличения массовой подачи воздуха в герметическую кабину 9 предназначен для перевода управления кондиционированием воздуха в режим максимальной подачи воздуха в ГК для приведения абсолютного давления воздуха в герметической кабине к заданному значению в соответствии с программой регулирования давления воздуха в ГК. Блок формирования сигнала опускания све-

тофильтра защитного шлема летчика 10 предназначен для подачи сигнала в штатное пиротехническое устройство защитного шлема для установки светофильтра защитного шлема летчика в нижнее положение с целью защиты лица летчика от скоростного напора, осколков остекления фонаря и средств поражения противника.

Работа представленной блок-схемы алгоритма заключается в следующем. На вход блока исходных данных 2 непрерывно поступает информация об адекватности действий оператора (от блока 3), об абсолютном давлении воздуха в герметической кабине и о скорости его изменения (от блока 4). Из блока исходных данных 2 полученную информацию передают по первому каналу в блок выявления неадекватных действий летчика 5 и по второму каналу – в блок определения разгерметизации кабины 6. На основании поступивших в блок определения разгерметизации кабины 6 данных о скорости изменения давления воздуха в герметической кабине в блоке 21 выполняют проверку условия (1). Если скорость изменения давления воздуха в кабине не превышает левую границу проверяемого условия $\frac{dP_{ГК}}{dt} \leq \frac{dP_{ГК1}}{dt}$ (результат

А), то в блоке определения разгерметизации кабины 6 продолжают контролировать скорость изменения давления воздуха в герметической кабине. Если условие (1) выполняется (результат «Да»), то в блоке 7 формируют сигнал аварийной разгерметизации, который приводит в действие блок формирования сигнала увеличения массовой подачи воздуха в герметическую кабину 9, блок формирования сигнала опускания светофильтра защитного шлема летчика 10, блок формирования сигнала аварийной подачи 100-процентного кислорода 11 и блок отправки сообщения руководителю полетов о разгерметизации кабины 12. Если скорость изменения давления воздуха в кабине превышает правую границу условия (1), то есть $\frac{dP_{ГК}}{dt} > \frac{dP_{ГК2}}{dt}$ (ре-

зультат Б), то в блоке 8 формируют сигнал взрывной разгерметизации, который приводит в действие блок формирования сигнала опускания светофильтра защитного шлема летчика 10, блок формирования сигнала аварийной подачи 100-процентного кислорода 11 и блок отправки сообщения руководителю полетов о разгерметизации кабины 12. Далее в блоке 22 выполняют проверку условия $P_{ГК} \geq P_{ГК1}$, где $P_{ГК1}$ – заданное значение абсолютного давления воздуха

в атмосфере на высоте, соответствующей нижней границе диапазона высот для высотных полетов. Если условие выполняется (результат «Да»), то приступают к проверке условия адекватности действий летчика в блоке 24. Если условие $P_{ГК} \geq P_{ГК1}$ не выполняется (результат «Нет»), то в блоке 13 формируют сигнал автоматического снижения самолета на безопасную высоту для передачи его в штатную систему автоматического управления полетом, осуществляют снижение самолета на заданную безопасную высоту в автоматическом режиме управления и контролируют величину абсолютного давления воздуха в герметической кабине в блоке 23 проверки условия $P_{ГК} = P_{ГК2}$. При достижении величины абсолютного давления воздуха в герметической кабине значения $P_{ГК2}$, соответствующего безопасной высоте полета, в блоке 14 формируют сигнал перевода самолета в горизонтальную плоскость и переходят к проверке условия адекватности действий летчика в блоке 24. Если действия летчика адекватны (результат «Да»), то в блоке 15 формируют сигнал ручного режима управления самолетом и дальнейший полет выполняют в ручном режиме управления. Если действия летчика неадекватны (результат «Нет»), то в блоке 16 определяют располагаемые дальность и время полета в зависимости от остатка топлива, в блоке 17 выбирают аэродром посадки, в блоке 18 вырабатывают управляющую информацию для системы автоматического управления полетом, обеспечивающую безопасный вывод самолета по пространственно-временной траектории на выбранный аэродром посадки, в блоке 19 выполняют ввод управляющей информации в автоматический контур управления самолетом, в блоке 20 формируют сигнал автоматического режима управления полетом самолета и дальнейший полет выполняют в автоматическом режиме управления. В случае возвращения летчика в работоспособное состояние он докладывает об этом руководителю полетов через бортовую радиостанцию, отменяет команды автоматического контура и переходит к пилотированию самолета в ручном режиме управления.

Заключение

Задача обеспечения безопасности функционирования производственных систем имеет различные пути решения. Авторы статьи предложили свой вариант, основанный на усилении актив-

ных защитных свойств подвижной производственной системы с эргатическим элементом.

Техническим результатом рассмотренного алгоритма управления при возникновении особой ситуации является повышение уровня собственных защитных свойств производственной системы, выраженное в упреждении внезапной утраты человеком-оператором работоспособного состояния в момент разгерметизации путем дополнительного измерения скорости изменения давления воздуха в ГК, позволяющего выполнить определенный комплекс действий, исключающих потерю человеком-оператором работоспособности на начальном этапе развития особой ситуации. Предлагаемый комплекс действий заключается в защите лица человека-оператора от скоростного напора, осколков остекления фонаря и средств поражения противника путем автоматического опускания светофильтра защитного шлема в нижнее положение, в наличии процедуры перевода управления кондиционированием воздуха в режим максимальной подачи воздуха при аварийной разгерметизации для предупреждения резкого снижения абсолютного давления воздуха в герметической кабине и приближении его к заданному значению, в наличии процедуры автоматического снижения объекта на заданную безопасную высоту при взрывной разгерметизации для уменьшения времени воздействия низкого атмосферного давления на организм человека-оператора и предупреждения утраты им работоспособного состояния из-за развития гипоксии, а также в наличии процедуры автоматического определения располагаемой дальности

и времени полета в зависимости от остатка топлива с последующим автоматическим полетом на выбранный аэродром.

Литература

1. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: теория, проектирование, применение. М.: Машиностроение, 2009. 760 с.
2. Эргатические интегрированные комплексы летательных аппаратов: монография / под ред. М.М. Сильвестрова. М.: ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2007. 512 с.
3. Попов Ю.В. Количественные показатели безопасности полетов // Проблемы безопасности полетов. 2015. № 2. С. 10–19.
4. Жмеренецкий В.Ф., Полулях К.Д., Акбашев О.Ф. Активное обеспечение безопасности полетов летательных аппаратов. Методология, модели, алгоритмы. М.: ЛЕ-НАНД, 2014. 320 с.
5. Проблемы обеспечения безопасности высотных полетов при разгерметизации кабины / М.В. Дворников, Ю.А. Кукушкин, В.Н. Чернуха, С.М. Кастерский, В.Г. Замятин, А.С. Куренков // Проблемы безопасности полетов. 2014. № 12. С. 36–42.
6. Бортовая активная система безопасности полетов ИКСЛ-2 / В.С. Воеводин, Е.Л. Дорофеев, А.В. Капустин, Ю.А. Янышев, М.В. Дворников, В.А. Сухолитко // Мехатроника. 2000. № 5. С. 19–21.
7. Илюшин Ю.С. Системы обеспечения жизнедеятельности и спасения экипажей летательных аппаратов: учебник. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1985. 244 с.
8. Пат. 2017144366 Российская Федерация; МПК G05D1/00/. Способ устранения особой ситуации при разгерметизации кабины самолета / Полуэктов С.П., Копылов А.А., Себелев М.В., Лавров Д.Ю.; заявитель и патентообладатель ВУНЦ ВВС «ВВА»; заявл. 18.12.2017; опубл. 18.06.2019, Бюл. № 17. 4 с.: ил.
9. ГОСТ 22607-77. Системы кондиционирования воздуха самолетов и вертолетов. Термины и определения. Введ. 1978-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1977. 8 с.

Информация об авторах

Полуэктов Сергей Павлович – канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8-910-343-25-01, e-mail: poluektov.sp@mail.ru

Струков Владимир Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8-910-340-60-14, e-mail: vsst1961@mail.ru

Копылов Александр Александрович – преподаватель кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8-980-348-56-23, e-mail: kopirishka84@yandex.ru

Себелев Максим Владимирович – курсант, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8-952-108-31-03, e-mail: siias@yandex.ru

Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-905-050-15-53

Поступила 31.10.2019; принята к публикации 10.12.2019

ALGORITHMIZATION OF MANAGEMENT OF ERGATIC ELEMENT OF PRODUCTION SYSTEM IN EXTREME CONDITIONS

S.P. Poluektov¹, V.S. Strukov¹, A.A. Kopylov¹, M.V. Sebelev¹, V.L. Burkovskiy²

¹ Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

² Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article substantiates the urgency of the problem of ensuring the safety of the functioning of production systems. One of the possible directions for solving this problem with respect to a movable production system with an ergatic element is presented. Prerequisites for enhancing the intrinsic protective properties of a production system with an ergatic element by equipping it with complex functioning safety systems that implement hazard control and ensure that basic functions are performed with a minimum probability of system death are argued. The reasons are given for developing a method for preventing sudden loss by a human operator of an efficient state when the system is operating in extreme conditions. Arguments are presented in favor of introducing an additional parameter into the state vector — the rate of change of air pressure in the pressurized cabin of the facility, which will allow to indirectly determine the type of depressurization at an early stage of the development of a special situation and form appropriate control parameters to prevent the transition of a special situation from emergency to catastrophic. An algorithm is presented for determining the moment of occurrence of a special situation in a production system with an ergatic element caused by emergency or explosive depressurization by additionally measuring the rate of change of air pressure in the hermetic cabin of the facility, as well as a set of actions that exclude the loss by the human operator of operability at the initial stage of development special situation

Key words: production system, ergatic element, human operator, hermetic cabin, depressurization, hypoxia, absolute air pressure, air pressure change rate

References

1. Makarov N.N. “Safety systems of onboard ergatic complex functioning: theory, design, application” (“Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: teoriya, proyektirovanie, primenenie”), Moscow, Mashinostroenie, 2009, 760 p.
2. Ed. Silvestrov M.M. “Ergonomics-integrated systems for aircraft: a monograph” (“Ergaticheskie integrirovannye komplekсы letatel'nykh apparatov: monografiya”), Moscow, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, 2007, 512 p.
3. Popov Yu.V. “Quantitative indicators of flight safety”, *Problems of Flight Safety (Problemy bezopasnosti polotov)*, 2015, no. 2, pp. 10-19.
4. Zhmerenetskiy V.F., Polulyakh K.D., Akbashev O.F. “Active safety of the aircraft. Methodology, models, algorithms” (“Aktivnoe obespechenie bezopasnosti poletov letatel'nykh apparatov. Metodologiya, modeli, algoritmy”), Moscow, LENAND, 2014, 320 p.
5. Dvornikov M.V., Kukushkin Yu.A., Chernukha V.N., Kastarskiy S.M., Zamyatin V.G., Kurenkov A.S. “Problems of safety of high-altitude flights at cabin depressurization”, *Problems of Flight Safety (Problemy bezopasnosti polotov)*, 2014, no. 12, pp. 36-42.
6. Voevodin V.S., Dorofeev E.L., Kapustin A.V., Yanyshchev Yu.A., Dvornikov M.V., Sukholitko V.A. “Onboard active flight safety system IKSL-2”, *Mechatronics*, 2000, no. 5, pp. 19-21.
7. Ilyushin Yu.S. “Life support systems and rescue crews of aircraft: textbook” (“Sistemy obespecheniya zhiznenedeyatel'nosti i spazeniya ekipazhey letatel'nykh apparatov: uchebnik”), Moscow, prof. N.E. Zhukovsky VVIA, 1985, 244 p.
8. Poluektov S.P., Kopylov A.A., Sebelev M.V., Lavrov D.Yu. “Solution to the special case of depressurization of the cockpit” (“Sposob ustraneniya osoboy situatsii pri razgermetizatsii kabiny samoleta”), patent 2017144366 Russian Federation, IPC G05D1/00/, bull. no. 17, 4 p.
9. GOST 22607-77 “Air conditioning systems of airplanes and helicopters. Terms and definitions” (“Sistemy konditsionirovaniya vozdukha samoletov i vertoletov. Terminy i opredeleniya. Vved.”), no. 1978-07-01, Moscow, 1977, 8 p.

Submitted 31.10.2019; revised 10.12.2019

Information about the authors

Sergey P. Poluektov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 “A” Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. 8-910-343-25-01, e-mail: poluektovsp@mail.ru

Vladimir S. Strukov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 “A” Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. 8-910-340-60-14, e-mail: vsst196@mail.ru

Aleksandr A. Kopylov, Lecturer, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 “A” Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. 8-980-348-56-23, e-mail: kopirishka84@yandex.ru

Maksim V. Sebelev, Student, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 “A” Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. 8-952-108-31-03, e-mail: si-ias@yandex.ru

Viktor L. Burkovskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. 8-905-050-15-53

МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА В ЛОКАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ПОТОКАМИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПРИОРИТЕТОВ

А.В. Лебедев П.В. Зобов

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается математическая модель передачи данных в общем канале со случайным множественным доступом. Она позволяет оценить среднее время передачи данных в потоках, вероятности передачи данных в потоках, среднюю длину очереди в устройствах передачи данных при несимметричном режиме работы. Алгоритм доступа основан на конкуренции с использованием фиксированных приоритетов с заданным количеством повторов через фиксированный интервал времени. Считается, что в системе осуществляется передача кодограмм (сообщений) фиксированной длительности. Потоки сообщений в системе являются пуассоновскими. Представленная модель включает в себя математическое описание трех взаимосвязанных случайных процессов - процесс передачи отдельного сообщения, процесс формирования очереди в памяти отдельных устройств и процесс занятия-освобождения общего канала передачи данных. Получены взаимосвязанные аналитические выражения и система дифференциальных уравнений, позволяющие оценить вероятностно-временные характеристики процесса обмена. Приведены результаты расчетов с использованием предложенной модели для оценки вероятностно-временных характеристик информационного обмена в микропроцессорной системе по интерфейсу I^2C . В отличие от традиционно используемых при решении такого рода задач имитационных моделей предложенная аналитическая модель существенно проще в реализации. Основное назначение модели - оценка параметров процесса передачи при проектировании систем передачи данных с общим каналом

Ключевые слова: канал передачи данных, случайный множественный доступ, микропроцессорная система, вероятность передачи сообщений, среднее время передачи сообщений, длина очереди, интенсивность потока сообщений, фиксированная длина сообщений

Введение

В настоящее время широкое распространение получили локальные вычислительные сети в составе автоматизированных систем обработки информации и управления, осуществляющие объединение электронных устройств различного назначения в единую систему. Данные системы используют широкополосный канал на базе одного из стандартных интерфейсов (например, I^2C), реализующий случайный множественный доступ к каналу передачи данных. При проектировании микропроцессорных систем возникает задача оценки вероятностно-временных характеристик процесса передачи, таких как среднее время передачи данных, вероятность потери сообщения при заданном алгоритме обмена с общим каналом, средняя очередь в отдельном устройстве. Решение данной задачи позволяет обоснованно выбрать элементную базу системы и параметры алгоритма передачи данных в устройстве.

В статье рассматривается процесс обмена данных (кодограмм) между устройствами, ко-

торые имеют постоянную длительность. При проигрыше арбитража за канал передачи данных устройство делает попытку повторной передачи через фиксированный интервал времени. Количество повторов передачи ограничено.

Приведенная система относится к классу систем массового обслуживания M/D/1. В [1-5] приведены модели подобных систем в предположении, что все потоки имеют или одинаковую интенсивность, или одинаковый приоритет (симметричный режим работы). Кроме того, в них исследуются иные механизмы разрешения конфликтов.

Предложенная в статье математическая модель позволяет оценить вероятностно-временные характеристики системы в несимметричном режиме работы при ограниченном количестве повторных передач в случае проигрыша арбитража с заданным временным интервалом между попытками повторной передачи данных.

Постановка задачи

Рассмотрим систему, в которой имеется несколько приемо-передатчиков сообщений, осуществляющих передачу через общий канал

передачи (рис. 1). В системе имеется возможность передачи сообщений от любого устройства к любому. Потоки сообщений фиксированной длительности будем считать пуассоновскими, также будем считать, что их интенсивности известны и различны.



Рис. 1. Структура системы передачи данных

В рассматриваемой системе каждый информационный поток имеет приоритет. При одновременной попытке передачи данных доступ к общему каналу предоставляется тому потоку, у которого более высокий приоритет. В случае если потоку отказывают в доступе к каналу передачи данных, информация помещается во внутренний буфер памяти устройства. По истечении интервала времени T_i делается повторная попытка передачи сообщений с i -го устройства. При передаче сообщений с этого устройства допускается k_i повторов.

Таким образом, исходными данными для моделирования системы являются:

1. Длительность передаваемых в системе сообщений величина постоянная и равна τ .

2. Набор параметров каждого из устройств T_i, k_i .

3. Вектор интенсивностей потоков информации $\Lambda = [\lambda_i] i=1, \dots, q$, где q - общее количество потоков в системе.

4. Упорядоченный по убыванию приоритетов список потоков следующей структуры:

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_q\},$$

где каждый элемент списка l_f представляет собой тройку вида

$$\langle n, m, r \rangle, \quad (1)$$

в которой

n - условный номер (адрес) устройства, инициирующего поток с условным номером f ;

m - условный номер (адрес) устройства получателя информации в потоке с условным номером f ;

r - ссылка (индекс) на интенсивность потока с условным номером f в массиве Λ .

Модель позволяет оценить вероятность передачи сообщения в каждом из потоков $P_{пер}^j(t)$, среднее время передачи сообщений в каждом из потоков t_j^{cp} и среднюю длину очереди для каждого из устройств N_{cp} .

Математическая модель

Выделим три взаимосвязанных случайных процесса - процесс передачи отдельного сообщения, процесс формирования очереди в буфере памяти приемо-передающего устройства, процесс занятия-освобождения линии передачи данных. Каждый из процессов имеет параметр, зависящий от вероятностно-временных характеристик других.

Рассмотрим случайный процесс передачи сообщения в системе. Граф состояний этого процесса приведен на рис. 2 применительно к j -му потоку передачи данных, который иницируется i -м устройством. Принадлежность потока устройству может быть определена по первому элементу тройки (1), являющемуся j -м элементом списка $L = \{l_1, l_2, \dots, l_r\}$. Поскольку номер потока однозначно соответствует номеру устройства, инициирующего передачу сообщений в этом потоке, будем условно обозначать это устройство индексом $i = \varphi(j)$.

Описание состояний процесса приведено в табл. 1. В каждый момент времени он описывается вектором вероятностей состояния. Вероятность перехода из состояния в состояние зависит от загрузки линии передачи данных. Эти вероятности, а также времена перехода из состояния в состояние являются параметрами модели. На рис. 2 эти параметры указаны над каждой из дуг.

Рассмотренная модель отражает возможные повторы при передаче сообщений, если линия занята (состояния $S_1, \dots, S_k$), а также возможную потерю сообщения, если k_i повторов передачи сообщения оказались неудачными (состояние S_{no}). При этом

$P_{сб}^j(t) (\overline{P_{сб}^j(t)} = 1 - P_{сб}^j(t))$ - вероятность того, что в момент времени t сообщение из j -го потока получило доступ к общему каналу передачи данных.

Для того, чтобы определить $P_{сб}^j(t)$ введем в рассмотрение вероятность $P_{зх}^j(t)$ захвата ли-

нии j -м потоком передачи данных в момент времени t , который может иметь место только в том случае, если линия свободна и в этот же момент времени отсутствует захват линии потоком более высоких приоритетов.

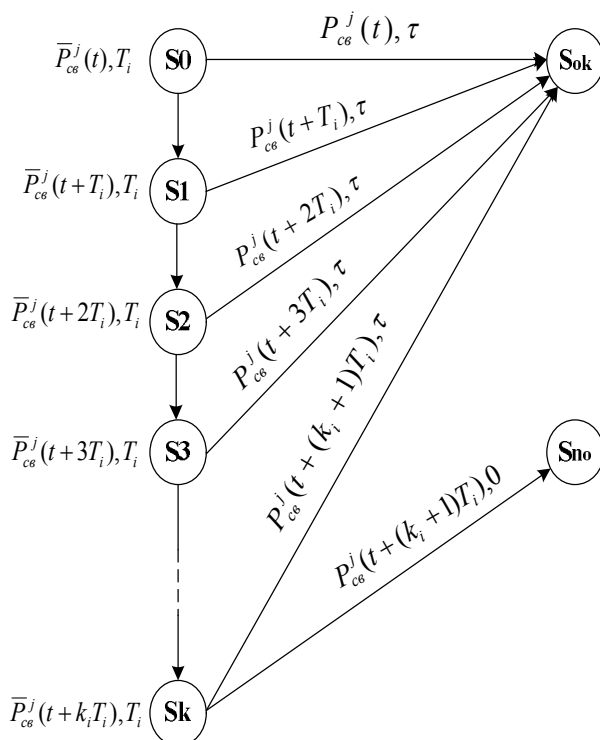


Рис. 2. Граф состояний процесса передачи сообщения

Таблица 1
Описание состояний процесса передачи сообщения

Обозначение состояния	Описание состояния
S0	Приход сообщения
S1	Завершение одного интервала ожидания
S2	Завершение двух интервалов ожидания
S3	Завершение трех интервалов ожидания
.	.
.	.
.	.
Sk	Завершение k интервалов ожидания
S ok	сообщение передано
S no	сообщение потеряно по истечению максимального количества интервалов ожидания

Тогда $P_{ce}^j(t)$ можно определить следующим образом:

$$P_{ce}^j(t) = P_{ce}(t) \prod_{l=1}^{j-1} (1 - P_{3l}(t)) . \quad (2)$$

В (2) индекс l соответствует номерам потоков с более высоким приоритетом, чем j , а $P_{ce}(t)$ – вероятность того, что канал передачи данных свободен, $P_{3l}(t)$ – вероятность занятия линии сообщением из потока с более высоким приоритетом (оценивается на основе модели канала общего доступа).

Процесс передачи отдельного сообщения изменяет состояния в моменты времени, связанные с завершением передачи сообщений. Вероятность передачи сообщения оценивается как суммарная вероятность всех путей, ведущих из состояния S_0 в состояние S_{OK} , вероятность потери сообщения как вероятность пути из состояния S_0 в S_{no} , вероятность нахождения сообщения в состоянии ожидания как вероятность нахождения в состояниях $S_1, S_2, \dots, S_k$. В рамках данной модели вероятность захвата линии сообщением (потоком, к которому относится данное сообщение) определяется как вероятность перехода из любого состояния ожидания $S_1, S_2, \dots, S_k$ в состояние S_{OK} . Кроме того, математическое ожидание времени пути из S_0 в S_{OK} является оценкой среднего времени передачи сообщения.

Исходя из пуассоновского характера входного потока, вероятность прихода сообщений для любого из потоков за малый интервал времени Δt равна

$$\rho_j = \lambda_j \Delta t (1 - \lambda_j \Delta t) = \lambda_j \Delta t - o(\Delta t^2),$$

тогда

$$P(S_0, t) = \rho_j . \quad (3)$$

Пусть процесс передачи сообщения в момент времени t находится в одном из состояний $S_0, S_1, \dots, S_k$. Тогда для этого момента времени вероятность перехода в состояние S_{OK} представляет собой вероятность захвата линии потоком, к которому принадлежит сообщение в этот момент времени. В случае, если такой захват состоялся, то сообщение будет передано в момент времени $t + \tau$. Таким образом, вероятность передачи сообщения в этот момент времени равна

$$P_{nep}^j(t) = P_{3x}^j(t - \tau) . \quad (4)$$

Вероятность захвата линии сообщением определяется следующим образом

$$P_{zx}^j(t) = P(S_0, t)P_{ce}^j(t) + P(S_1, t)P_{ce}^j(t) + \dots + P(S_{k_i}, t)P_{ce}^j(t) = (P(S_0, t) + P(S_1, t) + \dots + P(S_{k_i}, t))P_{ce}^j(t). \quad (5)$$

Каждое из слагаемых в (5) соответствует вероятности одновременного наступления статистически независимых событий – нахождения процесса передачи сообщения в одном из состояний S_l^i , где $l = 0, k_i$, и нахождения канала передачи данных в состоянии “свободно”. При этом для $n \geq 1$

$$P(S_n, t) = P(S_0^i, t - nT_{\varphi(j)}) \prod_{m=1}^n \overline{P_{ce}^j(t - mT_{\varphi(j)})}. \quad (6)$$

Так как оценку вероятности захвата линии сообщением из j -го потока осуществляют только при условии, что сообщение попало в систему, вероятность состояния S_0 для любого из моментов времени полагаем равной единице. Подставляя (6) в (5), получаем оценку вероятности захвата линии сообщением из j -го потока

$$P_{zx}^j(t) = P_{ce}^j(t) \left(1 + \sum_{l=1}^{k_{\varphi(j)}} \prod_{m=1}^l \overline{P_{ce}^j(t - mT_{\varphi(j)})} \right). \quad (7)$$

Пусть
$$\alpha_j(t) = 1 + \sum_{l=1}^{k_{\varphi(j)}} \prod_{m=1}^l (1 - P_{ce}^j(t - mT_{\varphi(j)})),$$

тогда:

$$P_{zx}^j(t) = P_{ce}^j(t) \alpha_j(t). \quad (8)$$

В данном соотношении при расчете $\alpha_j(t)$, если $t - lT_{\varphi(j)} < 0$, вероятность $P_{ce}(t - mT_{\varphi(j)})$ полагаем равной единице.

Среднее время передачи сообщений в j -м потоке определится как математическое ожидание времени перехода из состояния S_0 в S_{OK} следующим образом:

$$t_j^{cp} = \tau + \sum_{l=1}^{k_{\varphi(j)}} (\tau + lT_{\varphi(j)}) \prod_{m=1}^l (1 - P_{ce}^j(t - mT_{\varphi(j)})). \quad (9)$$

Для оценки $P_{ce}(t)$ рассмотрим модель процесса занятия-освобождения линии передачи данных. Граф состояний этого процесса для случая, если все потоки имеют различный приоритет, приведен на рис. 3, описание состояний графа приведены в табл. 2.

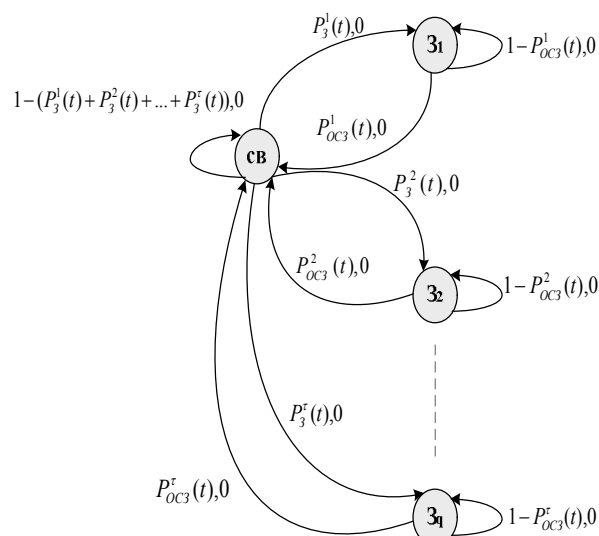


Рис. 3. Граф состояний процесса занятия-освобождения линии передачи данных

На рис. 3 в качестве параметров модели указаны $P_j^j(t)$ - вероятность захвата линии j -м потоком, $P_{oc3}^j(t)$ - вероятность освобождения линии j -м потоком. При оценке первой величины, являющейся характеристикой канала передачи, необходимо, в отличие от оценок для отдельного сообщения, учитывать вероятность прихода сообщения в потоке за малый интервал времени Δt , которая определяется из (3). Подставляя это значение в (6) и повторяя выкладки, приведенные при выводе (7), (8), получаем:

$$P_j^j(t) = \rho_j P_{zx}^j(t) = \rho_j P_{ce}^j(t) \alpha_j(t). \quad (10)$$

Оценим вероятность освобождения линии j -м потоком в интервале времени $[t, t + \Delta t]$ при условии, что в момент времени t она является занятой (Δt малый интервал). Для этой цели разобьем интервал $[t - \tau, t]$ на отрезки длиной Δt и обозначим через A_r событие, которое заключается в захвате линии j -м потоком в один из моментов времени, принадлежащих интервалу $[t - \tau + r\Delta t, t\tau + (r+1)\Delta t]$ и $r \in [0, n], n = \frac{\tau}{\Delta t}$. Пусть B событие, заключающееся в том, что линия занята потоком j хотя бы в части интервала времени $[t, t + \Delta t]$. Очевидно, что любое из событий A_r с вероятностью единица приводит к возникновению события B ($P(B/A_r) = 1$).

Таблица 2
Описание состояний процесса
занятия-освобождения линии передачи данных

Обозначение состояния	Описание состояния	Значения вероятностей состояний в начальный момент времени
СВ	Канал передачи свободен	
3_1	Канал передачи захвачен потоком высшего приоритета (первый элемент из списка (1))	1
3_2	Канал передачи захвачен потоком второго приоритета (второй элемент из списка (1))	0
...		0
3_q	Канал передачи захвачен потоком самого низкого приоритета (последний элемент из списка (1))	0

Кроме того, если событие B имеет место, то события A_r / B образуют полную группу. Также очевидно, что линия будет освобождена в интервале $[t, t + \Delta t]$ в том случае, если ее захват состоится в момент времени $[t - \tau, t - \tau + \Delta t]$, то есть если будет иметь место событие A_0 . В этом случае $P_{осв}^j(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P(A_0 / B)$ и с использованием формулы Байеса получаем:

$$P_{осв}^j(t) \approx P(A_0 / B) = \frac{P(A_0)}{\sum_{i=0}^n P(A_i)} = \frac{P_{св}^j(t - \tau) \rho_{ij} \alpha_{ij}(t - \tau)}{\sum_{i=0}^n P_{св}^j(t - \tau + r \Delta t) \rho_{ij} \alpha_{ij}(t - \tau + r \Delta t)} \quad (11)$$

Для любого из состояний 3_j , $j = 1, \dots, q$ имеем

$$P_{3j}(t + \Delta t) = P_{3j}(t)(1 - P_{осв}^j(t)) + P_{св}(t)P_3^j(t).$$

Данное соотношение преобразуется к виду:

$$\frac{dP_{3j}(t)}{dt} = P_{св}(t) \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_3^j}{\Delta t} - P_{3j}(t) \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{осв}^j}{\Delta t}.$$

С учетом (10) и (11) имеем:

$$\frac{dP_{3j}(t)}{dt} = P_{св}(t) \lambda_j P_{св}^j(t) \alpha_j(t) - P_{3j}(t) \frac{P_{св}^j(t - \tau) \lambda_j \alpha_j(t - \tau)}{\int_{t-\tau}^t P_{св}^j(t) \lambda_j \alpha_j(t) dt} \quad (12)$$

Система уравнений (12) относится к классу нелинейных систем с запаздывающим аргументом. Наличие установившегося режима в такой системе может быть проверено путем ее численного решения для интервала времени, определяемого из условий реального функционирования системы передачи данных.

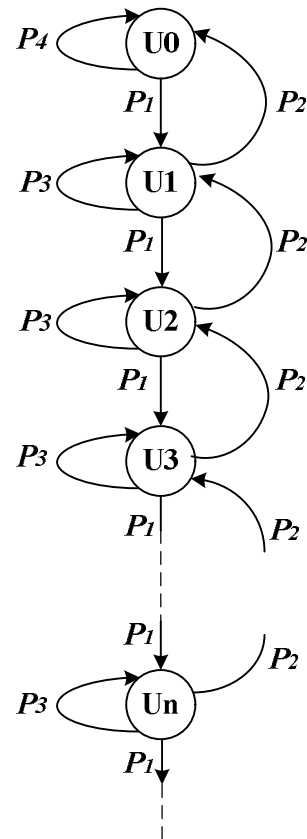


Рис. 4. Граф состояний очереди

При оценке средней длины очереди для каждого из устройств будем рассматривать модель очереди бесконечной длины. Ее граф состояний приведен на рис. 4, описание состояний в табл. 3.

В данной модели P_1 – вероятность постановки сообщения в очередь в течение малого промежутка времени Δt . P_2 – вероятность извлечения сообщения из очереди в течение Δt . $P_4 = 1 - P_1$, $P_3 = 1 - (P_1 + P_2)$ вероятность того, что в течение интервала времени Δt в очередь не будут добавлены сообщения. Далее

будем рассматривать установившийся режим в очереди, поэтому данные параметры будем считать независимыми от времени. Введем обозначения

$$\pi_1 = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{P_1}{\Delta t}, \pi_2 = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{P_2}{\Delta t}. \quad (13)$$

Составив уравнения для установившегося режима, получаем, что вероятность k -го состояния процесса определяется соотношением

$$P_k = \left(\frac{\pi_1}{\pi_2}\right)^k \left(1 - \frac{\pi_1}{\pi_2}\right). \quad (14)$$

Таблица 3

Описание состояний очереди

Обозначение состояния	Описание состояния
U0	Отсутствие сообщений в буфере устройства
U1	Одно сообщение в буфере устройства
U2	Два сообщения в буфере устройства
.	.
.	.
Un.	n сообщений в буфере устройства.
.	.
.	.
.	.

Средняя длина очереди определяется соотношением:

$$N_{cp} = \sum_{k=0}^{\infty} k P_k = \frac{\pi_1}{\pi_2 - \pi_1}. \quad (15)$$

Для рассматриваемой задачи вероятность P_2 равна сумме $P_3^j(t)$ вероятностей, причем суммирование ведется по всем потокам, исходящим с конкретного устройства. Вероятность P_1 равна вероятности перехода процесса передачи сообщения из состояния S_0 в состояние S_1 для каждого из потоков, исходящих с устройства. В соответствии с (10) и рис. 2 получаем устройства:

$$\pi_2 = \sum_{j \in M_i} \lambda_j P_{ce}^j \alpha_j.$$

$$\pi_1 = \sum_{j \in M_i} \lambda_j (1 - P_{ce}^j). \quad (16)$$

В (16) M_i - множество потоков, исходящих с j -го устройства. Соотношения (4), (9), (15) позволяют определить вероятность передачи сообщений для каждого из потоков, среднее

время передачи сообщений для каждого из потоков и среднюю длину очереди для каждого из устройств.

Результаты моделирования

Полученные выше соотношения были опробованы для анализа системы передачи кодограмм фиксированной длины по интерфейсу I^2C , включающей в себя три микропроцессора. Предполагалось, что каждое из устройств имеет адрес (от 1 до 3), а разрешение конфликтов при доступе осуществлялось в соответствии со спецификациями этого интерфейса, то есть меньший адрес устройства обеспечивал ему больший приоритет. Расчет с использованием (4), (9), (12), (15) осуществлялся для системы, в которой имело место четыре потока. Список (1), задающий взаимосвязи источников и приемников информации в системе, имел вид:

$$\{ < 2,1,1 >, < 3,1,2 >, < 1,2,3 >, < 1,4,4 > \}.$$

Производился расчет средней длины очереди для нескольких наборов значений интенсивностей потоков, начиная с набора, когда все интенсивности равны $L = \{0.9, 0.9, 0.9, 0.9\}$ (набор 1), с последовательным уменьшением интенсивности потоков низких приоритетов. Длительность сообщений в системе принята равной 0.5с, интервал повтора для каждого из устройств одинаков и равен 0.1с, количество повторов также одинаково для всех устройств и равно 7. На рис. 5 приведены зависимости средней длины очереди для различных векторов интенсивности потоков.

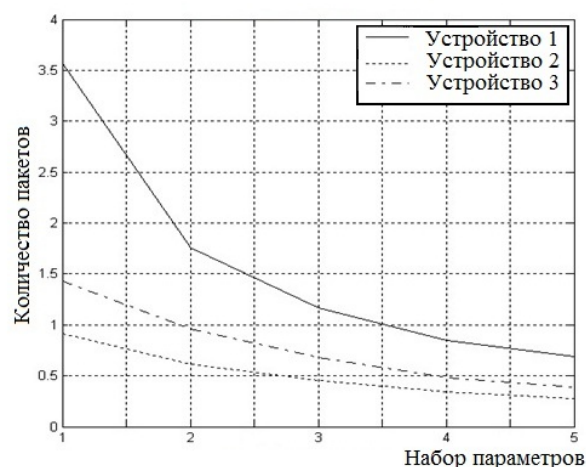


Рис. 5. Зависимость средней длины очереди от набора параметров

Расчет приведен для векторов
 $L = \{0.9, 0.9, 0.8, 0.7\}$ (набор 2),
 $L = \{0.9, 0.9, 0.7, 0.5\}$ (набор 3),

$L = \{0.9, 0.9, 0.5, 0.3\}$ (набор 4),

$L = \{0.9, 0.9, 0.3, 0.2\}$ (набор 5).

Из графика видно, что в случае симметричного режима работы имеет место существенное различие в средней длине очереди для различных устройств. При усилении неравномерности потоков средняя длина очереди на различных устройствах начинает сближаться. Оценка вероятностей передачи сообщений в установившемся симметричном режиме работы системы может быть определена по графикам на рис. 6.

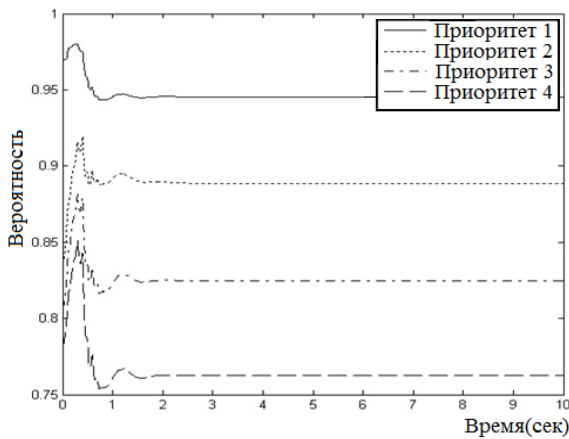


Рис. 6. Вероятность передачи в потоках как функция времени функционирования сети

Из них видно, что имеет место существенное различие в этих характеристиках для потоков различных приоритетов.

С использованием предложенной модели возможен подбор устройств T_i, k_i , обеспечивающих близкие значения вероятностей потери сообщения для различных потоков.

На основе распределения (14) для заданной вероятности P возможно оценить предельное значение длины, очередь которой не будет превышена для каждого из устройств. Для этого необходимо оценить вероятность того, что длина очереди будет в интервале от $[0, n_{\max}]$, то есть выполняться условие

$$\left(1 - \frac{\pi_1}{\pi_2}\right) \sum_{i=0}^{n_{\max}^i} \left(\frac{\pi_1}{\pi_2}\right)^i \leq P.$$

Решение этого неравенства имеет вид:

$$n_{\max}^i = \left\lceil \frac{\lg(1-P)}{\lg\left(\frac{\pi_1}{\pi_2}\right)} \right\rceil. \quad (17)$$

На рис. 7 приведены графики зависимости длины очереди (объема памяти устройств) для рассмотренной системы от значений интен-

сивностей потоков. Из графиков видно, что эти значения могут существенным образом отличаться для различных устройств, что позволяет обосновать индивидуальные требования к памяти микропроцессорных устройств в зависимости от структуры потоков в локальной вычислительной сети.

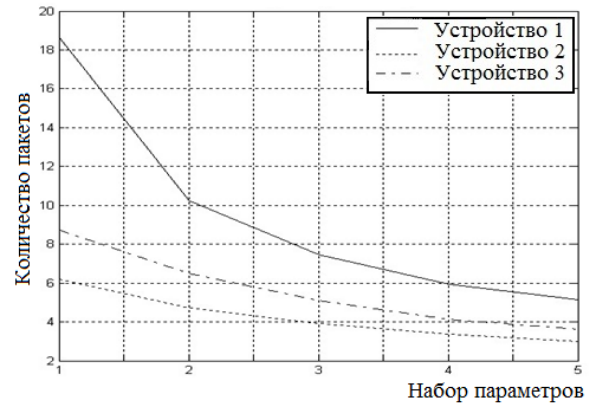


Рис. 7. Графики зависимости длины очереди (объема памяти устройств) для рассмотренной системы от значений интенсивностей потоков

Заключение

В статье получены аналитические соотношения (4), (7), (8), позволяющие оценить вероятность передачи сообщений для каждого из потоков, (9) - среднее время передачи сообщений для каждого из потоков. В эти соотношения входит значение вероятности того факта, что общий канал свободен для передачи данных j -м потоком (потоком j -го приоритета). Для оценки этой величины необходимо решить систему нелинейных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом (12). Решение этой систем уравнений для большого числа практических задач показало наличие установившегося режима в работе системы, что позволило оценить показатели функционирования для каждого из потоков и для каждого из устройств в соответствии с (15)-(16).

Полученная модель может быть реализована в любой системе компьютерной математики, при этом ее реализация существенно проще, чем имитационной модели, а полученные результаты могут быть использованы для обоснования объема памяти устройств и таких параметров алгоритма, как максимальное количество повторов и интервал времени между повторами для каждого из устройств.

Литература

1. Kleinrock L., Lam S.S. On Stability of Packet Switching in a Random Multi-Access Broadcast Channel: Proc. Of 7th

Hawaii Intern. Conf. on System Sciences: Special Subconf. On Comput. Nets, Honolulu, Hawaii, 1974. Jan. 8-10. P. 73-77.

2. Kobayashi H., Onozato Y., Huynh D. An Approximate Method for Design and Analysis of an ALOHA System // IEEE Trans. Commun. 1977. Vol. COM-25. P. 148-158.

3. Resource Allocation and Sharing for Heterogeneous Data Collection over Conventional 3GPP LTE and Emerging NB-IoT Technologies / V. Begishev, V. Petrov, A. Samuylov, D. Moltchanov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, K. Samouylov //

Comput. Communicat. 2018. Vol. 120:2. P. 93-101.

4. Степанов С.Н., Степанов М.С. Эффективный алгоритм оценки требуемого объема ресурса беспроводных систем связи при совместном обслуживании гетерогенного трафика устройств Интернета Вещей // Автоматика и телемеханика. 2019. № 11. С. 108-126.

5. Прангишвили И.В., Подлазов В.С., Стецюра Г.Г. Локальные микропроцессорные вычислительные сети. М.: Наука, 1984.

Поступила 08.10.2019; принята к публикации 10.12.2019

Информация об авторах

Лебедев Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина” (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54”А”), e-mail: alex-214@yandex.ru

Зобов Павел Викторович - старший преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина” (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54”А”), e-mail: wwwpvz@yandex.ru

MODEL OF RANDOM MULTIPLE ACCESS IN A LOCAL COMPUTER NETWORK WITH FLOWS OF VARIOUS INTENSITY AND PRIORITIES

A.V. Lebedev, P.V. Zobov

Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

Abstract: a mathematical model of data transmission in a common channel with random multiple access is considered. It allows one to estimate the average data transmission time in flows, the probability of data transmission in flows, the average queue length in data transmission devices with asymmetric operation. The access algorithm is based on competition using fixed priorities with a given number of repetitions over a fixed time interval. It is believed that the system transmits codograms (messages) of a fixed duration. The message flows in the system are Poisson. The presented model includes a mathematical description of three interconnected random processes - the process of transmitting a separate communication, the process of forming a queue in the memory of individual devices and the process of occupying-releasing a common data transmission channel. Interconnected analytical expressions and a system of differential equations are obtained that allow one to evaluate the probability-time characteristics of the exchange process. The results of calculations using the proposed model for assessing the probability-time characteristics of information exchange in a microprocessor system using the I2C interface are presented. In contrast to the simulation models traditionally used in solving this kind of problem, the proposed analytical model is much simpler to implement. The main purpose of the model is to evaluate the parameters of the transmission process in the design of data transmission systems with a common channel

Key words: data channel, random multiply access, microprocessor system, data transmission probability, average data transfer time, queue length, message stream intensity, fixed message length

References

1. Kleinrock L., Lam S.S. “On stability of packet switching in a random multi-access broadcast channel”, *Proc. of 7th Hawaii Intern. Conf. on System Sciences: Special Subconf. On Comput. Nets*, Honolulu, Hawaii, Jan. 8-10, 1974, pp.73-77.

2. Kobayashi H., Onozato Y., Huynh D. “An approximate method for design and analysis of an ALOHA system”, *IEEE Trans. Commun.*, 1977, vol. COM-25, pp. 148-158.

3. Begishev V., Petrov V., Samuylov A., Moltchanov D., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K., “Resource allocation and sharing for heterogeneous data collection over conventional 3GPP LTE and emerging NB-IoT technologies”, *Comput. Communicat.*, 2018, vol. 120:2, pp. 93-101.

5. Stepanov S.N., Stepanov M.S. “An efficient algorithm for estimating the required amount of the resource of wireless communication system in the joint servicing of heterogeneous traffic of the Internet of Things”, *Automation and Telemechanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 2019, no. 11, pp. 108-126.

6. Prangishvili I.V., Podlazov V.C., Stetsyura G.G. “Local microprocessor computing networks” (“Lokal'nye mikroprotsessornye vychislitel'nye seti”), Moscow, Nauka, 1984.

Submitted 08.10.2019; revised 10.12.2019

Information about the authors

Aleksey V. Lebedev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54”A”) Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia, e-mail: alex-214@yandex.ru

Pavel V. Zobov, Assistant Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54”A”) Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia, e-mail: wwwpvz@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

О.Н. Основина, П.И. Жуков

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального
исследовательского технологического университета «МИСиС»,
г. Старый Оскол, Россия

Аннотация: рассматривается комплексный подход обеспечения поддержки ремонтпригодности, эксплуатации и отказоустойчивости технологического оборудования промышленных предприятий на базе разработки и внедрения интегрированной логистической системы, основанной на знаниях. Формализация знаний экспертов позволит сохранить и аккумулировать результаты практических и научных работ, полученные в части обеспечения требуемой надежности оборудования в рамках его эксплуатации. Актуальность исследования обусловлена возможностью сокращения совокупных затрат на эксплуатацию и, как следствие, оптимизацией стоимости жизненного цикла оборудования и продления его ресурса работоспособности. Разработка базы знаний в области надежности вместе с известными математическими методами расчета представляет практическую ценность для промышленных предприятий. Исследованные модели представления знаний обеспечивают сценарии преобразования знаниевых ресурсов в виде последовательности вызова операций между объектами предметной области, реализованными с помощью классов. Категоризация данных и знаний, реализованная с помощью методологии ARIS позволяет определить возможности и ограничения проектируемой системы. С помощью UML-диаграмм разработан визуальный универсальный конструктор построения базы знаний и механизма логического вывода на знаниях. Управление знаниями обеспечивает интеграцию взаимодействия всех участников жизненного цикла оборудования и формирование объективных предпосылок для разработки и создания единого информационного окружения

Ключевые слова: интегрированная логистическая поддержка, эксплуатационная надежность, диагностика, поддержка эксплуатации, база знаний, экземпляры классов

Введение

Эффективная эксплуатация технологического оборудования (ТО) в современных условиях обеспечивается за счет оптимизации его жизненного цикла (ЖЦ) в стоимостных категориях, а именно: определением наилучших мер поддержки ремонтпригодности, надежности и эксплуатации.

Системный подход к обеспечению жизненного цикла ТО в послепродажный период требует внедрения многокритериального комплекса мероприятий в области управленческих решений нацеленных на снижение совокупных затрат на эксплуатацию. Одним из таких подходов, по мнению авторов, можно считать разработку и внедрение системы интегрированной логистической поддержки (ИЛП).

Под ИЛП понимают [1]:

- управление средствами материально-технического обеспечения. Составление планов контроля состояния ТО, его диагностики и ремонта;
- расчет длительности безотказной работы эксплуатируемого ТО, основанный на опе-

ративной оценке и анализе надежности показателей;

- анализ эксплуатационных затрат;
- ведение учета запасных частей и комплектов ЗИП, составление планов закупки и поставок;
- обеспечение взаимодействия клиента в лице эксплуатанта и производителя, направленного на упрощение процесса диагностики и ремонта ТО, сбора и обработки статистики о неисправностях и отказах, а также сопровождение интегрированных процессов повышения надежности;
- формирование и ведение ремонтной, эксплуатационной и иной документации в электронном виде.

Теоретическая основа управления знаниями при эксплуатационной поддержке оборудования

Практическая реализация перечисленных выше аспектов эксплуатационной поддержки ТО требует разработки и внедрения интегрированной интеллектуальной логистической системы (ИИЛС), которая бы осуществляла процесс управления знаниями и была интегриро-

вана с системами управления инженерными данными о ТО. Подобная система позволит предотвратить временные и ресурсные потери в процессе планирования и реализации взаимодействий между всеми участниками процесса поддержки.

Важным компонентом ИИЛС является база знаний (БЗ), в которой содержится структурированная информация, описывающая исследуемую предметную область. Соответственно, первоочередной задачей при разработке ИИЛС является формирование модели представления знаний предметной области, которая должна обеспечивать [2]:

- представление иерархического множества терминов, определяющих объекты предметной области;
- отображение разнородных отношений между объектами, описывающих таксономию и специфику предметной области;
- использование декларативных и процедурных правил для описания достоверных фактов и семантики предметной области;
- упрощение обмена и возможность повторного использования знаний.

Кроме того, для обеспечения технической, методической и информационной поддержки эксплуатации ТО и его отдельных комплектующих элементов на протяжении всего ЖЦ требуется постоянная актуализация данных и знаний.

Методы анализа и расчета надежностных показателей для специализированных классов ТО приводят к неизбежному усложнению инженерных методик расчета для практического применения [3].

Отталкиваясь от этого, внедрение многомерного контроля эксплуатации ТО средствами ИИЛС, которая агрегирует и обобщает весь набор методик расчета и знаний по их применению, становится не только целесообразным, а в какой-то мере необходимым условием осуществления поддержки эксплуатации на практике.

Такой подход обеспечит возможность решения широкого круга задач, оставаясь при этом на более высоком системном уровне. Помимо прочего, также позволит собирать и накапливать результаты практической и научной деятельности по заданному направлению.

Важным аспектом актуальности исследуемой проблемы также является тот факт, что подобные системы, включающие базы знаний, математические методы расчета и анализа в области обеспечения надежности являются для

промышленных предприятий более ценными, чем существующие прикладные программные решения.

Основным преимуществом ИИЛС является возможность выступать в качестве единого информационного ресурса не только конкретного предприятия, но и отрасли в целом, за счет постоянного пополнения системы знаний и набора методов расчета и анализа.

Совокупность профессиональных знаний об эксплуатационной надежности технологического оборудования подразделяется на явные (объективные) и неявные (субъективные). Неявные знания, которые содержатся в головах отдельных сотрудников и специалистов, являются неформализованными и зачастую скрытыми (персональный опыт, навыки, образование и т.п.). Примерами таких знаний могут быть:

- знания о возможных видах и причинах нарушения работоспособности ТС;
- знания о способах обнаружения аварийных ситуаций и идентификации дефектов и отказов (в том случае, если проводится органолептический контроль);
- знания о способах предотвращения (замедления) развития опасных последствий отказов и т.д.

Явные знания, которые содержатся в документах и справочниках, можно считать формализованными, так как ввиду наличия разнообразных требований к документированию такие знания уже представлены определенными на естественном или искусственном языке.

Формальные профессиональные знания нельзя считать наивысшим уровнем, так как предполагается, что и такого рода знания можно обобщить, получив при этом метазнания. Такие сведения предполагают наличие взаимосвязей между знаниями, т.е. они определяют процесс применения профессиональных знаний в конкретных областях и ситуациях.

В настоящее время существует ряд причин, обуславливающих объективные сложности при извлечении, приобретении и использовании знаний, а именно [2]:

- устаревшие модели представления знаний с неадекватным языковым описанием;
- несогласованность в терминологии у производственных специалистов и онтоинженеров;
- фрагментация извлекаемых знаний, не позволяющая сформировать целостную модель конкретной предметной области;

- неизбежные потери знаний предметной области при унификации пространства эксперта;

- трудности при выполнении семантического анализа, из-за отсутствия единого словаря предметной области.

Очевидна объективная актуальность задачи моделирования знаний как ресурса предприятия. При этом сотрудники подразделений предприятия, прямо или косвенно участвующие в поддержке эксплуатации ТО, должны в полной мере использовать свой опыт, разнородные данные и знания, приобретенные и накопленные в течение длительного срока.

Разработка базы знаний ИИЛС при помощи ARIS-методологии

Концептуально ИИЛС представляет целевую совокупность интегрированных моделей. Основным назначением таких моделей является обработка и хранение знаний экспертов, содержащихся в электронных технических руководствах (ИЭТР), базах данных (БД) и архив-

ных документах, а также предоставление доступа к способам аналитической оценки этих знаний.

Поскольку безотказность и эффективность эксплуатации ТО определяется с учетом вероятности успешного выполнения требуемых функций на рассматриваемом интервале времени [4], то в качестве основного элемента унификации, типизации и стандартизации при разработке концепции предметной области выбран объект типа «функция».

Для данного объекта с целью обеспечения терминологической согласованности специалистов разных структурных подразделений предприятия, взаимосвязи и иерархической упорядоченности множества объектов процесса контроля эксплуатационной надежности, удобства компьютерной обработки, была разработана модель технических терминов, представленная на рис. 1. Для ее реализации авторами была выбрана ARIS - методология, как универсальный конструктор, адаптируемый для моделирования разнородных знаний о предметной области.

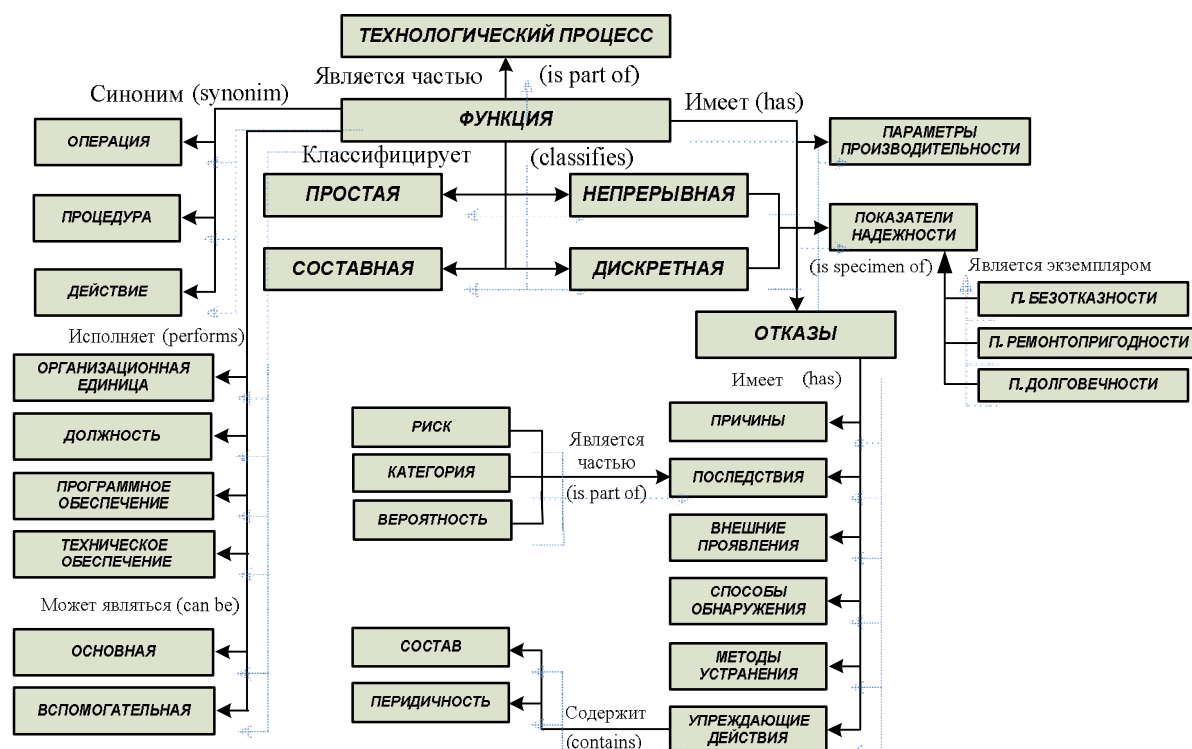


Рис. 1. Объект «функция», представленный с помощью ARIS-модели технических терминов

Для обеспечения эффективного контроля эксплуатации ТО требуется проведение функционального анализа, в рамках которого необходимо использовать профессиональные зна-

ния трех типов, которые в дальнейшем необходимо учитывать в разрабатываемой ИИЛС:

- знания о функциях;
- знания о функциональных отказах;
- знания о функциональной надежности.

В каждом из перечисленных типов знаний должна быть сконцентрирована и организована информация, необходимая для структурирования основных аспектов знаний и характеристики атрибутов обозначаемых объектов.

Методология ARIS позволяет моделировать процессы создания, подготовки и применения такого рода знаний с использованием различных нотаций и диаграмм, например, применяя eEPCs и eERMs диаграммы. Данные структурные представления в рамках ARIS позволяют, применяя конструкции представления, идентифицировать и структурировать знания определенных категорий, а также описывать и обобщать их распределения в рамках конкретных субъектов (например, производственных подразделений).

На рис. 2 представлена разработанная авторами «Диаграмма структуры знаний», которая содержит типы объектов – «Категория знаний», представляющая объект с содержимым, относящимся к конкретным явным и неявным знаниям и «Документированные знания» – объекты, отражающие хорошо формализуемые данные, хранящиеся в виде электронных документов и подлежащие передаче или использованию без процедур предобработки.

Осознанное распределение информации предметной области или данных, основанных на её анализе по важным категориям знаний, выявление и агрегирование документированных знаний позволяют определить потенциал и ограничения в поддержке разрабатываемой ИИИС.

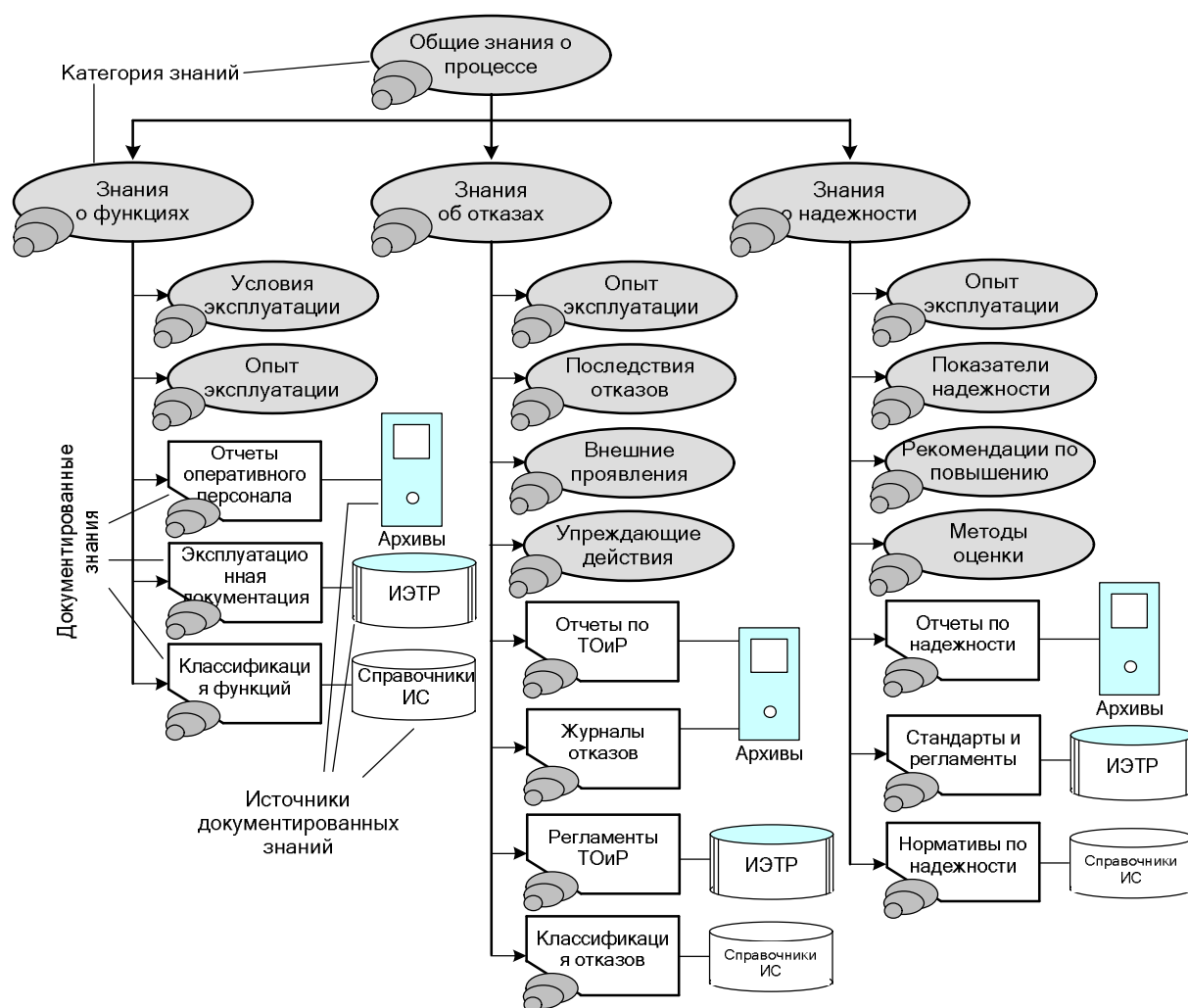


Рис. 2. Диаграмма структуры знаний

Диаграмма структуры распределения знаний (рис. 2) показывает, что элементы типа «категория знаний» и «документированные знания» являются иерархически зависимыми и

представляют собой различные уровни формализации. Однако в рамках «категории знаний» иерархическая зависимость отсутствует, что обусловлено слабой формализуемостью и

вложенностью таких знаний. Например, такие категории, как «знания о надежности», могут включать в себя другие категории знаний такие, как «методы оценки» или «рекомендации по повышению». При этом «документированные знания» не могут иметь на более низких уровнях иерархии неявные категории знаний, и являются по своей сути конечным представлением знания.

Согласно разработанной диаграмме (рис. 2) формализуемые знания (документированные знания) имеют место хранения – это могут быть как ИЭТР, архивные индексируемые электронные хранилища, так и справочные базы данных различных ИС, интегрированных в ИИЛП.

Результаты применение объектно-ориентированного подхода к моделированию знаний

Проведенный системный анализ позволил выявить характерные объекты процесса поддержки эксплуатации ТО и установить связи между ними. Для построения концептуальной структурированной статической модели базы знаний и сокращения затрат на последующую разработку программного обеспечения ИИЛС авторами был выбран объектно-ориентированный подход, позволяющий формировать комплекс именованных совокупностей объектов (классов), их атрибутов (свойств), выполняемых операций (методов) [5]. На рис. 3 представлена разработанная UML диаграмма классов, отображающая различные отношения с объектами выбранных классов.

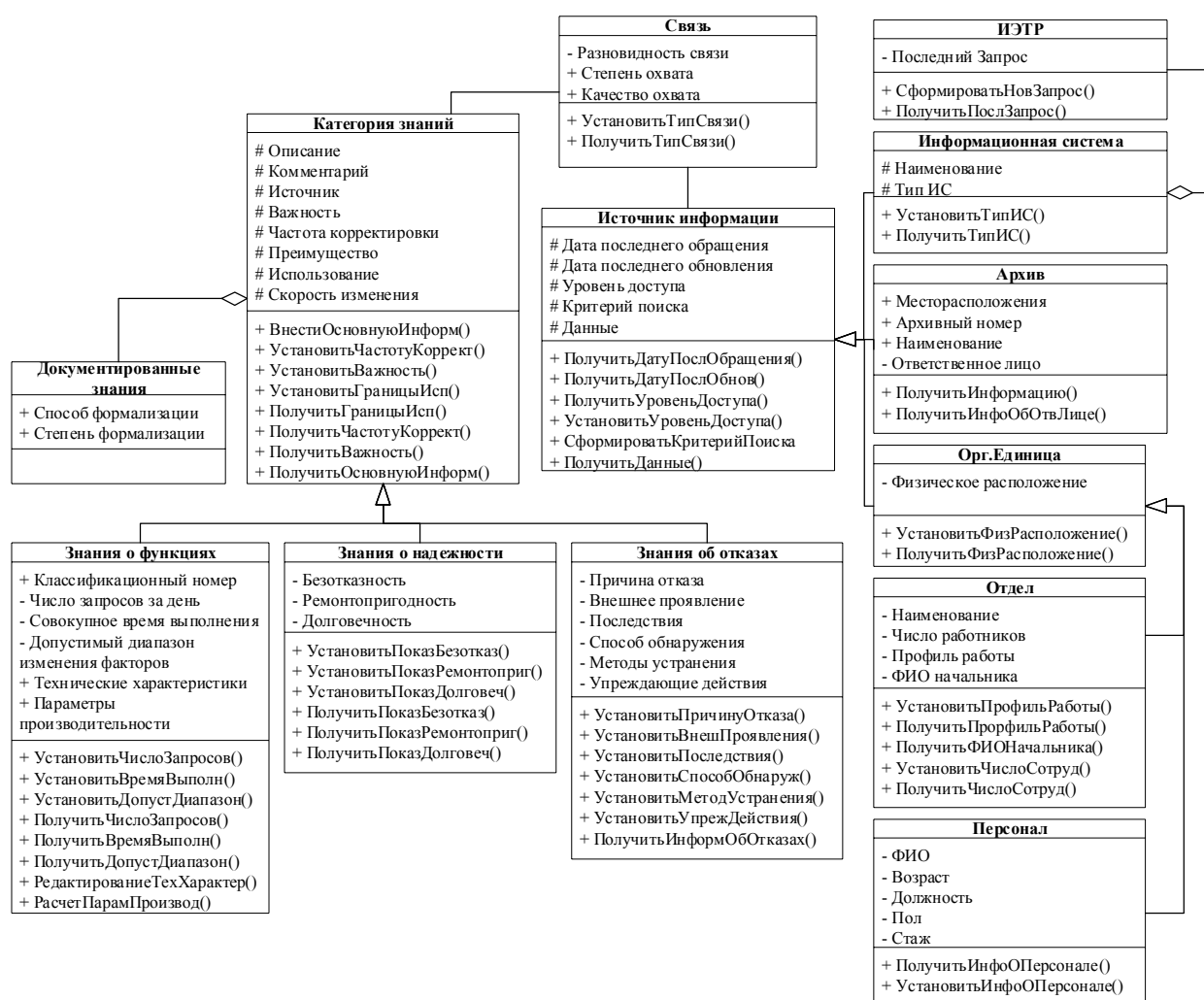


Рис. 3. Статическая модель БЗ, представленная с помощью UML диаграммы классов

Имена классов берутся из словаря технических терминов моделируемой системы. Суперклассом диаграммы является класс «Категории знаний», который находится в отношении обобщения с классами-потомками «Знания о функциях», «Знания об отказах», «Знания о надежности», которые наследуют его свойства и поведение. Для отображения иерархии одиночного наследования такой же тип отношений связывает классы-потомки «Информационная система», «Архив» и «Организационная единица» с классом-предком «Источники информации». Классы «Документированные знания» и «ИЭТР» состоят в отношении агрегации с классами «Категории знаний» и «Информационная система» соответственно. Объекты класса «Категории знаний» связаны ассоциацией с объектами класса «Управление знаниями», который, в свою очередь, имеет ассоциацию с классом «Источник информации», что позволяет осуществлять перемещение от экземпляров одного класса к другому, применяя атрибут «Процедуры». «Степень охвата» характеризует объем определенного знания в конкретном источнике информации, если подразумевается тип связи «распорядится». Данный атрибут, выраженный в процентном отношении, при 100% характеризует полный охват, при 0% характеризует абсолютное отсутствие знаний в заявленном источнике.

«Качество охвата» определяются через атрибут «Степень охвата» следующим образом.

Таблица 1

Соотношение атрибутов охвата знания

Качество охвата	Степень охвата
Низкий	1-25%
Средний	25-50%
Высокий	50-75%
Максимальный	75-100%

Для атрибутов и операций, на основании принципов инкапсуляции, а также существующих ограничений, связанных с возможной политикой предприятия, указаны следующие типы видимости:

- *private* (частный);
- *#protected* (защищенный);
- *+ public* (общий).

Доступ к атрибутам с типом видимости *private* извне класса возможен посредством соответствующих операций с типом видимости *public*. Такой подход позволяет повысить устойчивость разрабатываемой системы, путем

разграничения зон видимости атрибутов для каждого класса объектов.

Класс «Категория знаний» имеет абстрактную оболочку, описывающую конкретные знания, относящиеся к определенным субъектам (например, подразделениям на предприятии). Соответственно атрибуты данного класса, предоставляют доступ к этим знаниям и могут служить для их идентификации при оптимизации управления знаниями.

В табл. 2 приведены примеры количественных атрибутов для класса «категория знаний», имеющих процентное выражение. Помимо численных атрибутов, данный класс имеет также категориальные и текстовые параметры.

Таблица 2

Примеры атрибутов класса «Категории знаний»

Атрибут	Диапазон изменения	Описание
Скорость устаревания	0-100%	0% – не устаревают 100% – теряют актуальность в реальном времени
Использование знаний	0-100%	0% – не используются. 100% – оптимально и полно используются

Для реализации динамического процесса логического вывода по знаниям и моделирование временных взаимодействий использовалась диаграмма последовательности нотации UML (рис. 4), описывающая сценарий преобразования знаниевых ресурсов в виде последовательности вызова операций между объектами классов модели.

Процесс решения задачи оценки надежности ТО инициирует «Отдел по оценке надежности», как экземпляр класса «Организационная единица».

Также во взаимодействии участвуют экземпляры классов «Источники информации», «Категории знаний», «Документированные знания» и «Информационная система».

С целью отражения возможности формализации знаний, их документирования, последующего учета и сохранения в ИИЛС (ИЭТР) на диаграмме последовательности реализован фрагмент условного взаимодействия *alt*, позволяющий выполнять функцию выбора методов/операций соответствующего класса.

Согласно правилам, порядок выполнения операций осуществляется сверху вниз. При необходимости можно выполнять выбор зна-

чения требуемого атрибута экземпляра класса. Диаграмма последовательности позволяет моделировать сценарии решения задачи оценки надежности посредством вызова операций и иллюстрировать процесс обмена сообщениями между объектами модели.

Заключение

С помощью ARIS-методологии и UML диаграмм реализован визуальный универсальный конструктор построения базы знаний и механизма логического вывода на знаниях.

Требуемые для его реализации извлечение, обработка, интеграция разнородных данных и знаний, приобретенных в течение длительного срока, обеспечивают формирование объективных предпосылок для создания единого информационного пространства. При наполнении БЗ знаниями о предметной области и метазнаниями этот конструктор представляет собой ИИЛС, реализующую концепт интегрированной логической поддержки эксплуатации технологического оборудования в области оценки эксплуатационной надежности.



Рис. 4. Модель временного взаимодействия экземпляров классов, представленная с помощью UML диаграммы последовательности

Литература

1. ГОСТ Р 53.393-2017. Интегрированная логистическая поддержка. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
2. Аксенов К.А., Гончарова Н.В. Системы поддержки принятия решений: учеб. пособие для вузов / под науч. ред. Л.Г. Доросинского. М.: Издательство Юрайт, Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. 2018. Ч. 1. 103 с.

3. Ефремов Л.В. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб: Art-Xpress, 2015. 206 с.
4. Основина О. Н., Боева Л. М., Симонова А.Г. Оценка эффективности автоматизированных систем управления с учетом показателей эксплуатационной надежности // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 1 (55). С. 56-60.
5. Гагарина Л.Г. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем: учеб. пособие. М.: ИД «Форум»: ИНФА-М, 2016. 384 с.

Поступила 17.10.2019; принята к публикации 16.12.2019

Информация об авторах

Основина Ольга Николаевна - канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных и информационных систем управления, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (309500, Россия, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42), e-mail: osnovin72@mail.ru
Жуков Петр Игоревич – магистрант кафедры автоматизированных и информационных систем управления, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (309500, Россия, г. Старый Оскол, мкр. Жукова, 50), e-mail: Zhukov.Petr86@yandex.ru

MODELING THE KNOWLEDGE BASE TO SUPPORT OPERATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

O.N. Osnovina, P.I. Zhukov

Starooskolsky Institute of Technology named after A.A. Ugarov (branch) of the National Research Technological University "MISiS", Stary Oskol, Russia

Abstract: a comprehensive approach is considered to provide support for maintainability, operation and fault tolerance of technological equipment of industrial enterprises, based on the development and implementation of an integrated logistics system based on knowledge. The formalization of expert knowledge will allow us to preserve and accumulate the results of practical and scientific work obtained in terms of ensuring the required reliability of equipment during its operation. The relevance of the study is due to the possibility of reducing total operating costs and, as a result, optimizing the cost of the equipment life cycle and extending its service life. The development of a knowledge base in the field of reliability, together with well-known mathematical methods of calculation, is of practical value for industrial enterprises. Implemented models for the representation of knowledge provide scenarios for the transformation of knowledge resources in the form of a sequence of invocation of operations between objects of a subject area implemented using classes. The categorization of data and knowledge, implemented using the ARIS methodology, allows one to determine the capabilities and limitations of the designed system. Using UML diagrams, a visual universal constructor was developed for constructing a knowledge base and a mechanism of logical inference on knowledge. Knowledge management provides the integration of the interaction of all participants in the equipment life cycle and the formation of objective prerequisites for the development and creation of a single information environment

Key words: integrated logistic support, operational reliability, diagnostics, operation support, knowledge base, classes

References

1. GOST R 53.393-2017 "Integrated logistic support. The main provisions" ("Integrirovannaya logisticheskaya podderzhka. Osnovnye polozheniya"), Moscow, Standartinform, 2017, 12 p.
2. Aksenov K.A., Goncharova N.V. "Decision support systems: manual" ("Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, Yurayt, Ekaterinburg, Ural University, 2018, part 1, 103 p.
3. Efremov L.V. "Problems of managing reliable-oriented technical operation of machines" ("Problemy upravleniya nadezhnostno-orientirovannoy tekhnicheskoy ekspluatatsiyey mashin"), St. Petersburg, Art-Xpress, 2015, 206 p.
4. Osnovina O.N., Boeva L.M., Simonova A.G. "Evaluation of the effectiveness of automated control systems taking into account indicators of operational reliability", Control Systems and Information Technology (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii), 2014, no. 1 (55), pp. 56-60.
5. Gagarina L.G. "Development and operation of automated information systems: textbook" ("Razrabotka i ekspluatatsiya avtoma-tizirovannykh informatsionnykh sistem: ucheb. posobie"), Moscow, Forum, INFA-M, 2016, 384 p.

Submitted 17.10.2019; revised 16.12.2019

Information about the authors

Ol'ga N. Osnovina, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Starooskolsky Institute of Technology named after A.A. Ugarov (branch) of the National Research Technological University "MISiS" (50 Zhukova m., Stary Oskol 309500, Russia), e-mail: osnovin72@mail.ru

Petr I. Zhukov, MA, Starooskolsky Institute of Technology named after A.A. Ugarov (branch) of the National Research Technological University "MISiS" (50 Zhukova m., Stary Oskol 309500, Russia), e-mail: Zhukov.Petr86@yandex.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА РАБОТЫ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРНЫХ МОДУЛЕЙ КОЛЬЦЕВОЙ ГЕОМЕТРИИ****О.В. Калядин, К.Г. Королев****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: проведен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик термоэлектрических генераторных модулей с заданной геометрией кольцевых термобатарей с использованием универсальной математической модели [1]. В качестве объекта моделирования использованы термоэлектрические модули, состоящие из серийно выпускаемых и экспериментальных генераторных термобатарей. В качестве материалов для ветвей термоэлементов были использованы серийные сплавы, выпускаемые АО "Корпорация НПО "РИФ", с n-типом проводимости ($\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$ с добавкой 0,2 % (масс.) Hg_2Cl_2) и p-типом проводимости ($\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ с добавкой 0,2 % (масс.) Pb), полученные методом холодного и последующего горячего прессования, а также экспериментальные - с повышенной добротностью. Для всех термоэлектрических материалов были известны температурные зависимости термоэдс, коэффициента теплопроводности и электропроводности. Изучено влияние геометрических характеристик термобатарей на рабочие параметры модуля, а также выполнен анализ эффективности экспериментальных материалов по сравнению с серийными. Результаты математического моделирования приведены графически в виде зависимостей КПД, электрической мощности и потребного теплового потока по горячей стороне генераторных модулей от электрического сопротивления внешней нагрузки, также получены вольтамперные характеристики и зависимости электрической мощности генераторных модулей от рабочего тока. Результаты расчетов показывают, что новая геометрия батареи позволяет повысить КПД генераторного модуля на 20 %. В свою очередь, использование новых термоэлектрических материалов дает дополнительный прирост КПД на 14,3 %, а также увеличивает рабочий диапазон экономичной работы. Рекомендуется использовать новые термобатареи в совокупности с новыми материалами для разработки автономных источников тока нового поколения

Ключевые слова: моделирование, КПД, термоэлектрический генератор, термобатарея кольцевой геометрии, стационарный процесс

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010г. № 218 (Договор № 03.G25.31.0246)

Введение

Развитие современных технологий неразрывно связано с поиском новых источников электроэнергии. Ее генерация с использованием термоэлектрических устройств является одним из перспективных, а в некоторых случаях единственно доступным способом прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Для широкого практического применения термоэлектрических генераторов их КПД сегодня слишком мал. Увеличить его возможно за счет разработки термоэлектрических материалов нового поколения, а также за счет оптимальных конструктивных решений. При разработке термоэлектрических устройств важную роль играет моделирование физических процессов, которое позволяет определить оптимальные геометрические характеристики термоэлементов и режимы работы устройств.

Такой подход позволяет при получении новых материалов провести численный эксперимент и оценить эксплуатационные характеристики термоэлектрических устройств, что значительно сокращает время на этапе проектирования.

Описание объекта моделирования

В качестве объекта моделирования использовались термоэлектрические генераторные модули, состоящие из кольцевых батарей (тип А и тип Б). Батареи типа А (рис. 1) выпускаются серийно АО "Корпорация НПО "РИФ", батареи типа Б (рис. 2) с увеличенной высотой ветви являются экспериментальными и были спроектированы с целью повышения экономичности термоэлектрического генератора.

Основанием конструкции батарей каждого типа является разрезная втулка толщиной 2 мм, выполненная из керамики Al_2O_3 , которая размещается на внешней стороне металлической трубы с толщиной стенки 3,5 мм. Внут-

ренная и внешняя поверхности втулки покрываются слоем из кремнийорганической термостойкой эмали толщиной $\sim 0,15$ мм для улучшения теплового контакта.

На внешней стороне разрезной втулки расположены ветви р- и n-типа в виде чередующихся кольцевых секторов прямоугольного сечения.

Сравнительные геометрические характеристики термобатарей представлены в таблице.

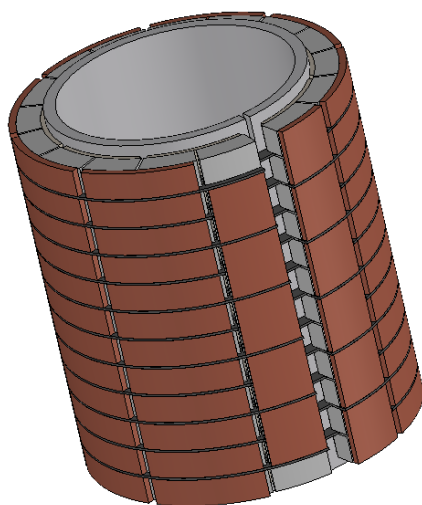


Рис. 1. Серийная термоэлектрическая генераторная батарея (тип А)

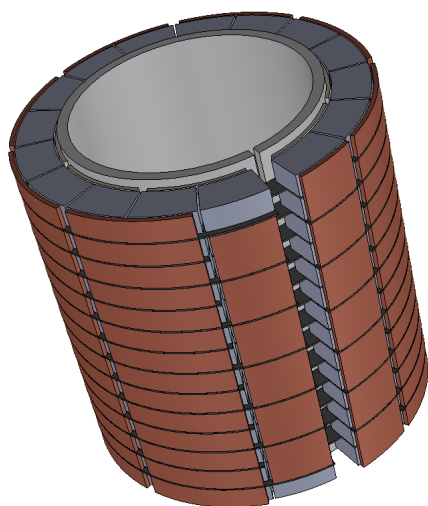


Рис. 2. Экспериментальная термоэлектрическая генераторная батарея с увеличенной высотой ветвей (тип Б)

Геометрические характеристики термоэлектрических батарей

Параметр	Термоэлектрическая батарея	
	тип А	тип Б
Высота ветви (по направлению тока)	5 мм	7 мм
Толщина ветви (вдоль оси втулки)	5,8 мм	4,4 мм
Внутренний радиус кольца термоэлементов (с учетом коммутации)	28 мм	25 мм
Зазор между ветвями	0,5 мм	0,4 мм
Ширина разрыва в кольце	5 мм	7 мм
Количество колец в батарее	12	14

Соединение термоэлементов выполнено посредством применения дугообразных коммутационных шин, последовательно соединяющих с помощью пайки 16 ветвей р- и n-типа в кольцо, которое так же, как и разрезная втулка имеет разрыв для снятия температурных напряжений.

По горячей стороне (внутренней) коммутационные шины выполнены из никелевых пластин толщиной 1 мм, а по холодной (внешней) – из медных, толщиной 1,5 мм.

На поверхности ветвей под коммутацию сформирован барьерный защитный слой ($\sim 0,3$ мм), препятствующий диффузии материала шины в материал ветви, а также обеспечивающий высокие адгезионные свойства. Этот слой может формироваться как на этапе прессования ветви, так и на этапе совместного прессования коммутационных шин и ветвей термоэлементов, а также может быть получен путем напыления. Барьерный слой выполняется из таких материалов, как никель и молибден.

Кольца электрически изолированы друг от друга с помощью текстолитовых прослоек толщиной 0,5 мм каждая, которые устанавливаются на этапе сборки батареи. По внешней ее стороне кольца электрически соединены с помощью дугообразных медных пластин.

На батарее размещается внешняя керамическая втулка толщиной 2,5 мм, выполняющая роль электроизолятора и теплопровода между коммутацией и внешним стальным кожухом с толщиной стенки 2 мм холодного теплообменника.

Тепловое сопряжение батареи, втулки и кожуха обеспечивается с помощью термостойкого силиконового клея-герметика толщиной слоя 0,15 мм.

Из отдельных батарей, соединенных последовательно по электрическому току и размещенных на одном термосифоне, собирается генераторный модуль.

Для проведения численного эксперимента и определения эксплуатационных характеристик модулей в качестве материалов для ветвей термоэлементов батарей были выбраны два типа материалов: серийные, выпускаемые АО "Корпорация НПО "РИФ", а также экспериментальные, полученные в ходе выполнения работ по договору № 03.G25.31.0246.

Образцы полупроводниковых материалов были получены на основе твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ (n-тип проводимости) и $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ (p-тип проводимости) в виде компактных брикетов по двухстадийной технологии порошковой металлургии методом холодного и последующего горячего прессования в стальных пресс-формах в вакууме шихты микрористаллических порошков $\text{Bi}_{2,0}\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$ и $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$. В качестве легирующего компонента в серийном материале n-типа использовали Hg_2Cl_2 (0,2 % вес.), p-типа – Pb (0,2 % вес.). Температура горячего прессования шихты материала n-типа составляла 370 °C, p-типа – 380 °C; время горячего прессования составляло 5 мин.

Экспериментальный термоэлектрический материал n-типа, в отличие от серийного, имел повышенное содержание Te (на 2,0 масс. %) и более высокую степень текстурированности, как следствие обладал увеличенным температурным режимом получения (400 °C) и продолжительностью (20 мин.) горячего прессования [2].

Экспериментальный термоэлектрический материал p-типа проводимости получен путем армирования серийного материала собственными оксидами [3]. Для этого в технологический процесс включена термическая обработка в кислородсодержащей среде пористой (пористость 8,5 %) заготовки материала после стадии холодного прессования. Содержание кислорода в материале для использованного режима окисления (продолжительность отжига 35 мин., температура 350 °C) составило 0,16 масс. %.

По результатам испытаний термоэлектрический модуль, состоящий из термобатарей (тип А) с ветвями высотой 5 мм, изготовленными из серийных материалов при температуре греющей среды 612,1 К, охлаждающей – 323 К (режим 1), выдает максимальную элек-

трическую мощность 196,3 Вт при напряжении на внешней нагрузке 24,21 В. Если же температуру греющей среды увеличить до предельно возможной 626,4 К, а охлаждающей снизить до 318 К (режим 2), можно достигнуть мощности 210,5 Вт при напряжении 25,09 В.

Задача математического моделирования стационарного процесса работы генераторного модуля состояла: в верификации предлагаемой модели; оценке перспектив применимости батарей типа Б; анализе эффективности экспериментальных материалов по сравнению с серийными.

Описание модели

Для моделирования процесса работы термоэлектрического генераторного модуля на заданную нагрузку в стационарном режиме была использована универсальная математическая модель [1]. В основе модели лежит система, включающая:

- уравнения энергетического баланса модуля в целом и его спаев:

$$W = Q - Q_0, \quad (1)$$

$$Q = (\alpha_n + \alpha_p) \cdot T_g \cdot I \cdot N_e - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_m + K_m \cdot (T_g - T_h), \quad (2)$$

$$Q_0 = (\alpha_n + \alpha_p) \cdot T_h \cdot I \cdot N_e + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_m + K_m \cdot (T_g - T_h), \quad (3)$$

где W - электрическая мощность модуля, подводимая к внешней нагрузке Q и Q_0 - тепловые потоки по горячей и холодной сторонам соответственно; T_g и T_h - температуры горячей и холодной спаев термоэлектрических батарей; I - сила генерируемого тока; R_m - электрическое сопротивление модуля; K_m - полная теплопроводность его ветвей; N_e - число термоэлементов; α_n и α_p - коэффициент Зеебека ветвей p- и n-типа;

- уравнения, устанавливающие связь между электрической мощностью W , КПД η , генерируемым током I , сопротивлением внешней нагрузки R_n и падением напряжения на ней U :

$$W = IU = I^2 R_n, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{W}{Q}, \quad (5)$$

- выражения, определяющие электрическое сопротивление модуля R_m , включая сопротивление ветвей, коммутационных шин R_{sh} и контактных площадок R_k , образованных припоем и подкоммутационным слоем:

$$R_m = \left[\frac{1}{\sigma_n} \cdot \frac{n}{2\pi \cdot \delta} \cdot \ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g} + \frac{1}{\sigma_p} \cdot \frac{n}{2\pi \cdot \delta} \cdot \ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g} \right] \cdot N_e + R_{sh} + R_k. \quad (6)$$

$$R_{sh} = \frac{1}{3} \cdot \left[\rho_{shg} \frac{l_{sh1}}{S_{sh1}} N_{sh1} + \rho_{shx} \frac{l_{sh2}}{S_{sh2}} N_{sh2} + \rho_{shx} \frac{l_{sh3}}{S_{sh3}} N_{sh3} \right], \quad (7)$$

$$R_k = 2\rho_k N_e \cdot \left[\frac{h_{g1}}{2\pi \cdot r_g - (n-1) \cdot s - f} \delta + \frac{h_{x1}}{2\pi \cdot r_x - (n-1) \cdot s - f} \delta \right], \quad (8)$$

где σ_n и σ_p – электропроводность ветвей р- и п-типа, n – число ветвей в кольце, δ – толщина ветви, f – ширина компенсационного шва, s – шаг между ветвями, r_x и r_g – радиус ветви по холодной и горячей сторонам, ρ_{shg} и ρ_{shx} – удельное электрическое сопротивление материала шин по горячему и холодному спаям, l_{sh} и S_{sh} – длина и площадь поперечного сечения шин по направлению движения тока (цифровой индекс в обозначениях величин определяется типом коммутационных шин: 1 – никелевые по горячей стороне, 2 – медные по холодной стороне для коммутации ветвей, 3 – медные по холодной стороне для коммутации колец), N_{sh} – число шин соответствующего типа, ρ_k – удельное электрическое сопротивление контактной площадки (определялось экспериментально и составляло $\sim 10^{-6}$ Ом·м), h_{g1} и h_{x1} – толщины контактных площадок по горячему и холодному спаям соответственно.

- выражения, определяющие полную теплопроводность генераторного модуля между горячим и холодным спаями, включая теплопроводность ветвей и изоляции между ними:

$$K_m = \left[\frac{2\pi \cdot \lambda_n}{\delta \cdot n} \cdot \frac{1}{\ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g}} + \frac{2\pi \cdot \lambda_p}{\delta \cdot n} \times \frac{1}{\ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g}} \right] \cdot N_e + K_{из}. \quad (9)$$

$$K_{из} = \frac{\lambda_{из}}{h} \cdot [s \cdot (n-1) \cdot \delta + f \cdot \delta] \cdot N_k +$$

$$+ \left[s \cdot (n-1) + f + \frac{n}{2} \cdot a_p + \frac{n}{2} \cdot a_n \right] \cdot \Delta \delta \times (N_k - 1), \quad (10)$$

где h – высота ветви, $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности изоляции, N_k – число колец в модуле, a_p и a_n – длина ветвей р- и п-типа по среднему радиусу;

- уравнения теплопроводности для всех вспомогательных слоев батарей (керамические втулки, стальные кожухи, слои эмали и герметика), которые в общем виде для горячей и холодной стороны соответственно имеют вид:

$$Q = \frac{2\pi \cdot H \cdot \lambda_{g(i)}}{\ln \frac{r_{g(i-1)}}{r_{g(i)}}} \cdot (T_{g(i)} - T_{g(i-1)}), \quad (11)$$

$$Q_0 = \frac{2\pi \cdot H \cdot \lambda_{x(j)}}{\ln \frac{r_{x(j)}}{r_{x(j-1)}}} \cdot (T_{h(j-1)} - T_{h(j)}), \quad (12)$$

где H – высота модуля, i и j – номера вспомогательных слоев по горячей и холодной сторонам считая от ветвей, $r_{g(i)}$ и $r_{g(i-1)}$ – внутренний и наружный радиусы вспомогательного слоя по горячей стороне, $r_{x(j-1)}$ и $r_{x(j)}$ – внутренний и наружный радиусы вспомогательного слоя по холодной стороне, $T_{g(i)}$ и $T_{g(i-1)}$ – температура внутренней и наружной поверхности вспомогательного слоя по горячей стороне, $T_{h(j-1)}$ и $T_{h(j)}$ – температура внутренней и наружной поверхности вспомогательного слоя по холодной стороне

- выражения, определяющие среднеинтегральные значения (в общем виде обозначим через y) термоэлектрических и теплофизических свойств материалов ветвей в интервале температур от T_h до T_g

$$y = \frac{\int_{T_h}^{T_g} y(T) dT}{T_g - T_h}, \quad (13)$$

здесь под $y(T)$ подразумеваются температурные зависимости электропроводности, коэффициента Зеебека и теплопроводности, полученные путем аппроксимации экспериментальных данных полиномами.

Необходимо отметить, что в рассмотренной модели приняты некоторые допущения, в частности:

- при моделировании процессов не учитывается теплообмен генераторного модуля с окружающей средой;

- принято, что градиент температур направлен нормально к боковой поверхности модуля;

- принято, что джоулево тепло, выделяющееся при протекании тока, распределяется поровну между холодным и горячим спаями.

Данные допущения значительно упрощают расчетную систему уравнений, при этом являются вполне допустимыми в рассматриваемой ситуации.

Переменными в полученной системе, относительно которых при заданной внешней нагрузке ведется решение, являются: $Q_0, Q, I, R_m, K_m, \eta, W, U, R_n, T_g, T_{g1}, T_{g2}, T_{g3}, T_{g4}, T_{g5}, T_h, T_{h1}, T_{h2}, T_{h3}, T_{h4}, T_{h5}, \alpha_n, \alpha_p, \sigma_n, \sigma_p, \lambda_n, \lambda_p$. Температуры на внешней и внутренней поверхностях модуля являются величинами заданными, температура греющей среды составляет 612,1 К, охлаждающей – 323 К.

Для решения системы уравнений (1-13) используется система компьютерной алгебры Mathcad.

Результаты моделирования

Было выполнено две серии численных экспериментов. В первой определялись эксплуатационные характеристики генераторного модуля, составленного из девяти батарей типа А, ветви которых были выполнены из серийных материалов. При этом рассматривались два вышеупомянутых режима работы, для которых уже проводились исследовательские испытания. В результате расчетов по модели для первого режима была получена выходная мощность модуля 197,31 Вт при напряжении на внешней нагрузке 23,16 В. Для второго режима – 222 Вт, при напряжении 24,6 В. Таким образом, максимальное рассогласование величины мощности составляет 5,2 %, напряжения – 4,3 %, что говорит о высокой степени соответствия предлагаемой модели реально протекающим процессам.

Во второй серии экспериментов был выполнен анализ влияния сопротивления внешней нагрузки на эксплуатационные характеристики термоэлектрических модулей.

По результатам вычислений были построены графические зависимости (рис. 3 – 5), отражающие зависимость рабочих параметров термоэлектрического модуля (КПД, электрическая мощность, потребный тепловой поток по горячей стороне) от сопротивления внешней нагрузки, которое варьировалось в интер-

вале от 0,2 до 19,8 Ом. На рис. 6 показаны вольтамперные характеристики модулей, на рис. 7 – зависимость выходной электрической мощности от величины рабочего тока.

При моделировании были рассмотрены четыре различные конфигурации генераторного модуля из девяти батарей (номера кривых на рисунках):

1 – серийные батареи с ветвями из серийных материалов;

2 – серийные батареи с ветвями из экспериментальных материалов;

3 – экспериментальные батареи с увеличенной высотой ветвей из серийных материалов;

4 – экспериментальные батареи с ветвями из экспериментальных материалов.

Из рис. 3 и 4 видно, что КПД модуля и вырабатываемая им мощность имеют максимум при определенном значении оптимального сопротивления, причем во всех случаях максимальный КПД достигается при большем сопротивлении нагрузки, чем максимальная электрическая мощность. Применение нового материала (кривые 2 и 4) не приводит к изменению оптимального сопротивления нагрузки, оно зависит только от геометрических характеристик батарей: для достижения максимального КПД при использовании серийных батарей величина сопротивления составляет 2,5 Ом, при использовании экспериментальных – 6 Ом; для достижения максимальной вырабатываемой мощности 2,2 Ом и 5,2 Ом соответственно.

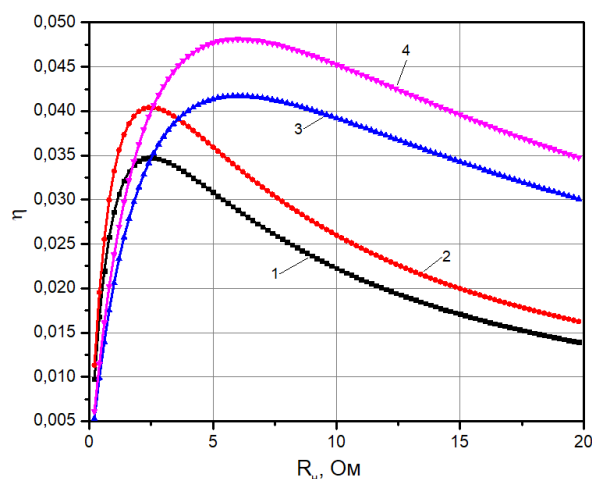


Рис. 3. Влияние сопротивления внешней нагрузки на КПД генераторных модулей

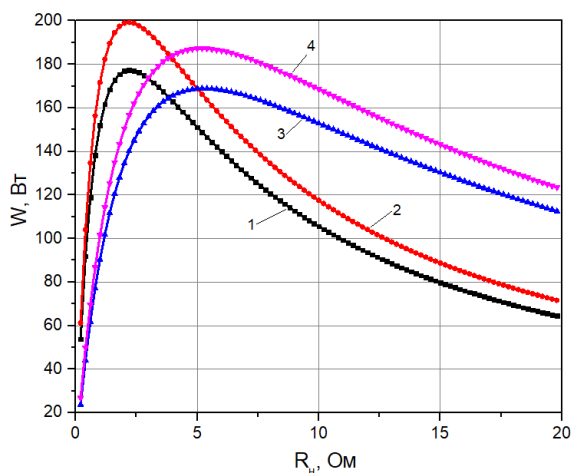


Рис. 4. Влияние сопротивления внешней нагрузки на электрическую мощность генераторных модулей

Также необходимо отметить, что применение экспериментальных батарей позволяет существенно увеличить максимальный КПД генераторного модуля (на 20 %): с 0,035 до 0,042 при выполнении ветвей из серийных материалов, и с 0,04 до 0,048 – из экспериментальных.

Применение экспериментального материала также позволяет повысить максимальный КПД генераторного модуля (на 14,3 %): при использовании серийных батарей с 0,035 до 0,04, при использовании экспериментальных – с 0,042 до 0,048.

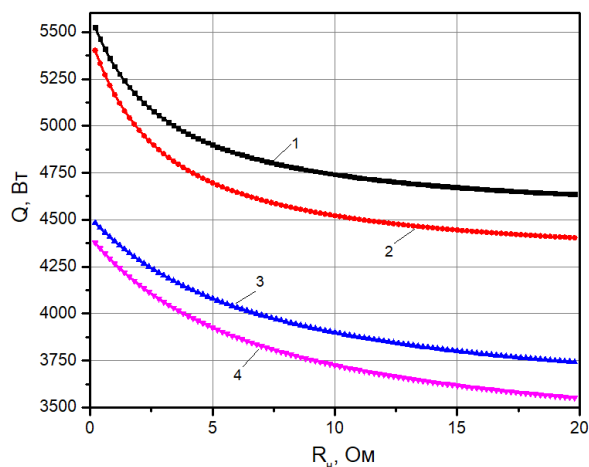


Рис. 5. Влияние сопротивления внешней нагрузки на потребный тепловой поток по горячей стороне генераторных модулей

Обращает на себя внимание еще и тот факт, что при использовании батарей типа Б ширина максимумов КПД и мощности значительно возрастает, следовательно, становится

шире диапазон изменения внешней нагрузки при сохранении экономичного режима работы.

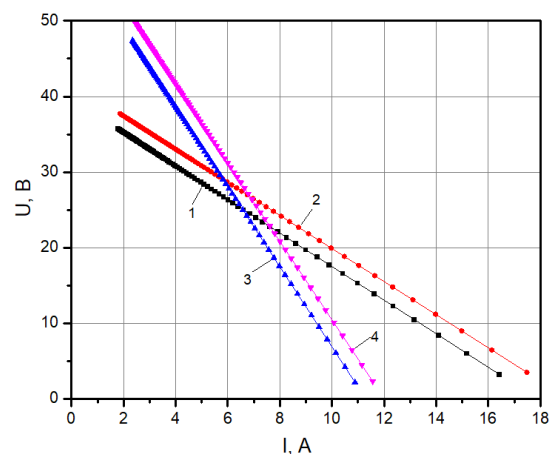


Рис. 6. ВАХ генераторных модулей

Так, например, если взять за базу значение КПД равное 0,04, то при использовании серийных батарей (тип А) с ветвями из серийных материалов такой КПД недостижим в принципе. Использование новых материалов позволяет достичь указанного значения КПД при работе на нагрузку вблизи оптимального значения (от 2 до 3 Ом). Применение батарей нового типа в совокупности с новым материалом расширяет область эффективного применения термоэлектрического генератора в диапазоне нагрузок от 2,5 до 19,6 Ом.

Из рис. 5 видно, что применение новых материалов позволяет снизить потребный тепловой поток по горячей стороне на ~ 4 %, а использование экспериментальных батарей – на ~ 16 %, что соответственно значительно снижает расход топлива.

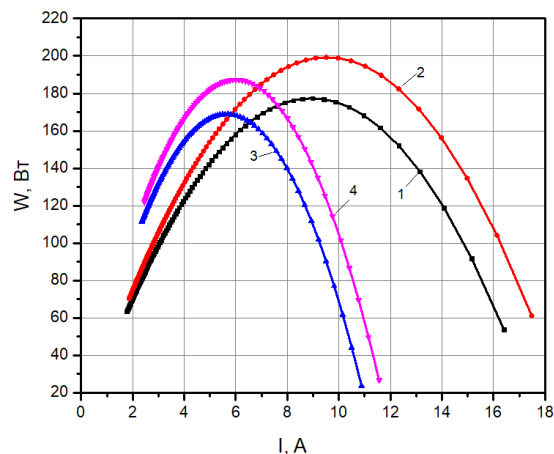


Рис. 7. Зависимость электрической мощности генераторных модулей от рабочего тока

Недостатком термобатарей нового типа является более низкая мощность и слаботочность. Так модуль из серийных батарей при использовании в них экспериментальных материалов вырабатывает 200 Вт при оптимальной нагрузке и не менее 180 Вт в диапазоне нагрузок от 1,1 до 4,2 Ом, тогда как модуль, выполненный из батарей с увеличенной высотой ветвей позволяет в пределах достичь лишь 187 Вт и обеспечить мощность выше 180 Вт при работе на нагрузку от 3,5 до 7,6 Ом. Ток, при котором достигается экстремальная мощность серийных батарей составляет ~ 9 А (при использовании экспериментальных материалов он немного возрастает), тогда как при использовании батарей нового типа оптимальный ток не превышает 6 А. При этом ширина максимума кривых мощности от тока при использовании серийных батарей значительно больше.

Заключение

Таким образом, в работе с использованием универсальной математической модели [1], построенной на основе инженерно-физических соотношений термоэлектрического анализа, была проведена серия численных экспериментов, в рамках которых были определены эксплуатационные характеристики генераторных модулей, состоящих из батарей, серийно вы-

пускаемых АО "Корпорация НПО "РИФ" и экспериментальных. Показана согласованность результатов расчета с экспериментальными данными, полученными для серийно выпускаемых термобатарей.

Проанализирована эффективность экспериментальных термоэлектрических материалов ветвей на рабочие параметры модулей. По итогам расчетов можно сделать вывод о перспективности применения новых термобатарей с увеличенной высотой ветвей, выполненных из экспериментальных полупроводниковых материалов, для изготовления генераторных модулей нового поколения, работающих в составе автономных источников тока.

Литература

1. Калядин О.В., Королев К.Г. Математическая модель термоэлектрического генераторного модуля кольцевой геометрии // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 38-45.
2. Влияние давления и времени выдержки при горячем прессовании на термоэлектрические свойства теллурида висмута / А.А. Гребенников, А.И. Бочаров, В.В. Бавыкин, И.В. Извекова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 170-174.
3. Влияние наноразмерного оксидного наполнителя на свойства халькогенидов висмута р-типа проводимости / Ю.В. Панин, И.С. Ильяшев, Ю.Е. Калинин, А.А. Камынин, К.Г. Королев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 151-156.

Поступила 23.09.2019; принята к публикации 09.12.2019

Информация об авторах

Калядин Олег Витальевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kaljadin@gmail.com

Королев Константин Геннадьевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: korolev.kg@mail.ru

SIMULATION OF STATIONARY PROCESS OF THERMOELECTRIC GENERATOR MODULES OF RING GEOMETRY

O.V. Kalyadin, K.G. Korolev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a comparative analysis of the operational characteristics of thermoelectric generator modules with a given geometry of ring thermopiles using a universal mathematical model. Thermoelectric modules consisting of commercially available and experimental generator thermal batteries were used as an object of simulation. As the materials for the thermoelement legs, we used serial alloys produced by RIF Corporation with n-type conductivity ($\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$ with the addition of 0.2% (mass.) Hg_2Cl_2) and p-type conductivity ($\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ with an addition of 0.2% (mass.) Pb) obtained by cold pressing and subsequent hot pressing, as well as experimental ones with improved quality factor. For all thermoelectric materials, the temperature dependences of the thermoelectric power, thermal conductivity and electrical conductivity were known. The influence of the geometric characteristics of thermopiles on the operating parameters of the module was studied, as well as the analysis of the effectiveness of experimental materials compared to serial ones. The results of mathematical modeling are presented graphically in the form of dependences of the efficiency, electric power and the required heat flux along the hot side of the generator

modules from the electrical resistance of the external load, and also the current-voltage characteristics and the dependences of the electric power of the generator modules on the operating current are obtained. The calculation results show that the new geometry of the battery allows one to increase the efficiency of the generator module by 20%. In turn, the use of new thermoelectric materials gives an additional increase in efficiency by 14.3%, and also increases the working range of economical operation. It is recommended to use new thermal batteries in conjunction with new materials for the development of autonomous current sources of a new generation

Key words: modeling, efficiency, thermoelectric generator, thermobattery of annular geometry, stationary process

References

1. Kalyadin O.V., Korolev K.G. "Mathematical model of the thermoelectric generator module of annular geometry", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol.14, no. 6, pp. 38-45.
2. Grebennikov A.A., Bocharov A.I., Bavykin V.V., Izvekova I.V. "Influence of pressure and holding time at hot pressing on thermoelectric properties of bismuth tellurid", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 6, pp. 170-174.
3. Panin Yu.V., Il'yashev I.S., Kalinin Yu.E., Kamynin A.A., Korolev K.G. "Nanosized oxide filler influence on the properties of p-type conductivity bismuth chalcogenides", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol.13, no. 6, pp. 151-156.

Submitted 23.09.2019; revised 09.12.2019

Information about the authors

Oleg V. Kalyadin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kaljadin@gmail.com

Konstantin G. Korolev, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: korolev.kg@mail.ru

ИНТЕРАКТИВНЫЙ МЕТОД НЕЙРОУПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ШИХТЫ В ЦЕМЕНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**Л.С. Казаринов, Дж.Р. Хасанов****Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия**

Аннотация: предлагается интерактивный метод нейроуправления контуром измельчения шихты при производстве цемента для полуавтоматических мельниц. При этом наиболее важными задачами этой системы являются обеспечение стабильного режима подачи и энергосбережение. Нейроуправление строится на основе обучения нейронной сети с учителем, в роли которого выступает опытный оператор мельницы, реализующий эффективное управление процессом измельчения. Нейроуправление рассчитывает оптимальные значения уставок для контуров распределенного управления на основе интерактивной вычислительной процедуры. Такой подход позволяет принимать эффективные решения по управлению процессом измельчения на основе согласования множества противоречивых технических условий. Основным преимуществом предлагаемого способа является то, что метод принятия решений по выбору значений управляющих факторов с учетом заданных технико-экономических ограничений позволяет оператору выбрать оптимальные параметры для загрузки мельницы по множеству противоречивых условий, что позволяет получить качественный продукт при минимизации потребляемых ресурсов. Разработанный на основе предложенного метода контроллер был проверен на модели контура измельчения для реальной мельницы. Результаты подтвердили эффективность предлагаемой системы диспетчерского управления, которая позволила увеличить производительность мельницы на 2,36% и одновременно снизить удельное энергопотребление на 2,29%

Ключевые слова: цемент, клинкер, нейронная сеть, шихта, процесс помола, оперативное управление

Введение

В цементной промышленности управление процессом измельчения в течение многих лет оставалось сложной проблемой из-за существующих неопределенностей моделей, нелинейностей, изменений параметров и их взаимозависимости.

На рис. 1 показана цементная шаровая мельница в замкнутом контуре с сепаратором. Внутри вращающейся мельницы поток подачи, состоящий из клинкера, шлака, гипса и других компонентов сырья, измельчается стальными шарами. С помощью элеватора продукт мельницы транспортируется в сепаратор, где в зависимости от регулируемой скорости и скорости воздушного потока он разделяется на поток отбракованных крупногабаритных частиц (крупка), который возвращается на вход мельницы для повторного измельчения, и поток мелкой фракции, который образует конечный продукт.

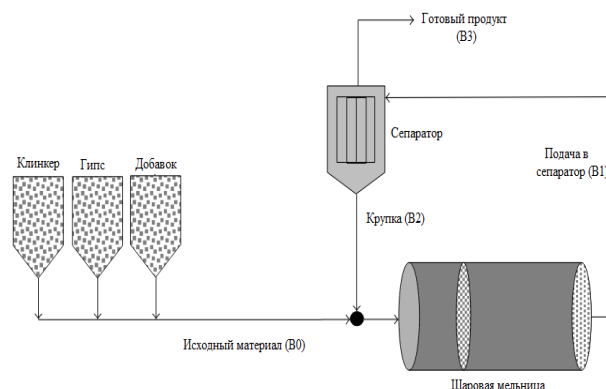


Рис. 1. Замкнутый контур измельчения

Помол цемента является высокоэнергоёмкой операцией в цементной промышленности, поэтому требуется эффективный контроль для снижения удельных производственных затрат (кВт ч/т произведенного цемента) при сохранении качества продукта, то есть тонкости цемента на приемлемом уровне.

Существует нелинейная зависимость продукта мельницы от загрузки мельницы (количества материала внутри мельницы) и твердости измельченного материала, что может иногда вызывать нестабильность системы, перегруз мельницы и прерывание процесса измельчения.

Конкретные производственные затраты также зависят от загрузки мельницы. В совре-

менной практике процессы измельчения все еще часто работают в ручном режиме или в ограниченных пределах с использованием простых моновариабельных контроллеров [1]. В течение последних 10 лет было предложено несколько подходов к управлению, включая методы линейного многопараметрического управления [2–4]. В последнее время исследовательские усилия были сосредоточены на контроллерах, которые могут предотвратить перегруз мельницы.

Линейные аппроксимации процесса измельчения являются стабильными и эффективными только вокруг номинальной рабочей точки. Существующие помехи (например, изменения в измельчаемости сырья) могут привести мельницу к новой рабочей точке, где контроллер не может стабилизировать установку.

В недавнем исследовании [5] была разработана упрощенная нелинейная модель схемы измельчения, которая способна реалистично воспроизвести явление закупоривания, и представлен контроллер обратной связи по состоянию на основе стратегии нелинейного прогнозирующего управления. Хотя предлагаемая система имеет большую область стабильности по сравнению с линейными контроллерами, риск забивания не был полностью исключен. В более поздней работе [7] при помощи модели контура измельчения, представленной в [6], предложен надежный нелинейный контроллер с обратной связью по состоянию, который способен предотвратить перегруз мельницы.

Методы управления с использованием классических контроллеров, предложенные в [1–7], могут быть эффективными, только если взаимосвязи между переменными правильно определены и смоделированы. Хорошо известно, что измельчение материала зависит от многих факторов мельницы: скорости, распределения размера шари, измельчаемости материала и гранулометрии. Из-за внутренней сложности процесса разработка точной модели контура измельчения цемента является непростой задачей, и, как указано в [4, 5], динамическое моделирование процессов измельчения все еще остается открытой областью.

Большинство заводов по переработке полезных ископаемых имеют распределенные системы управления для своего основного уровня управления, но эти системы управления должны эксплуатироваться квалифицированными и хорошо осведомленными операторами для запуска схемы измельчения при за-

данных параметрах. Управление контуром измельчения доставляет больше проблем операторам диспетчерского пункта из-за его нелинейного и сложного поведения [8]. Чтобы справиться с проблемами в работе или стабилизировать/оптимизировать схему, операторы должны ответить на следующие вопросы для каждого управляющего действия:

- Какая манипулирующая переменная должна быть изменена?
- Каким должно быть значение новой уставки?
- Когда оператор должен изменить заданное значение?

Следующие проблемы также будут возникать, когда заданные значения рассчитываются и вставляются в распределенные системы управления операторами вручную:

- заданные значения, определенные операторами, необязательно являются оптимальными, поскольку операторы всегда беспокоятся о состоянии перегрузки мельницы/контура. Таким образом, они поддерживают скорость подачи мельницы ниже расчетного значения;
- поскольку изменения в заданных значениях являются ступенчатыми (не сглаживают непрерывные значения), колебания значений процесса будут неизбежны;
- ошибки в выборе правильной управляющей переменной и задержки во времени реакции операторов нельзя игнорировать;
- в зависимости от уровня знаний и опыта различных операторов, они могут по-разному контролировать контур измельчения, даже в одной и той же ситуации;

Автоматические расчеты заданных значений с помощью современных систем управления могут исправить проблемы традиционных систем, распределенных систем управления при ручных вычислениях и выборе манипулирующих переменных. Существуют различные типы продвинутых систем управления, таких как многопараметрическое управление, основанное на модели и прогнозировании управления, адаптивное управление и стратегии управления на основе искусственного интеллекта (ИИ), такие как нечеткая логика, нейронная сеть, генетический алгоритм или их комбинация.

Существует несколько публикаций, связанных со стратегиями, основанными на знаниях, и системами управления с использованием нечеткой логики для применения в измельчении материалов. Но на самом деле существует несколько публикаций в области нечетких систем управления для контуров мельниц.

Краткий обзор статей в области нечетких систем управления для контуров измельчения

Авторы [9] представили нечеткую экспертную систему для управления скоростью сепаратора в контуре измельчения цементной промышленности. В работе [10] предложена модель прогнозирующего контроллера для контура измельчения в шаровой мельнице для управления взаимодействиями между входными и выходными переменными. В работе [11] использовали генетический алгоритм для оптимизации параметров нечеткого контроллера в MATLAB/Simulink. В работе [12] предложили теоретически улучшенную стратегию энергосбережения и снижения загрязнения в контурах измельчения в шаровой мельнице. Автор [13] разработал интеллектуальный метод развязки для управления шаровой мельницей. Нелинейности управляются с помощью подхода нейронной сети. Авторы [14] предложили оптимизированную систему управления на основе искусственного интеллекта для контуров измельчения в шаровой мельнице, которая была испытана в Китае. В работе [15] описана теоретическая архитектура системы управления цементным чистовым шлифованием. Предложенная система управления настраивает подачу свежего сырья на основе четырех входных переменных в нечеткий контроллер.

Принимая во внимание вышеупомянутые характеристики контура измельчения цемента и анализируя выше представленные работы, предлагается интерактивный выбор решений при оперативном нейроуправлении. Основным преимуществом данного способа является то, что метод принятия решений по выбору значений управляющих факторов с учетом заданных технико-экономических ограничений позволяет оператору выбрать оптимальные параметры для загрузки мельницы по множеству противоречивых условий, что позволяет получить качественный продукт при минимизации потребляемых ресурсов.

Оперативное нейроуправление контуром измельчения шихты

Рассматриваемое оперативное нейроуправление контуром измельчения моделируется в работе среды MATLAB/Simulink с использованием встроенного пакета Neural Network и набора инструментов. Предлагаемый метод очень удобен для пользователя, и опера-

торы могут видеть результаты с помощью графиков для лучшего управления системой. Основная цель оперативного нейроуправления контура измельчения - максимально приблизить установку к проектным значениям путем расчета оптимальных заданных значений в соответствии со свойствами подачи и условиями работы мельницы. Большинство преимуществ оперативного нейроуправления контура измельчения перед человеческими стратегиями контроля:

1) оперативное нейроуправление может контролировать несколько параметров одновременно, в то время как оператор диспетчерской не может контролировать несколько параметров в такое короткое время и обрабатывать переменные одновременно;

2) оперативное нейроуправление обновляется каждый час в соответствии с рабочими данными мельницы (ввод переменных в контроллер). Таким образом, контур измельчения будет иметь плавную кривую для каждой выходной (манипулирующей) переменной (то есть скорости подачи, скорости крупки, удельный расход электроэнергии, тонкость по Блейну и мощность двигателя мельницы);

3) оперативное нейроуправление поддерживает производительность мельницы очень близко к ее проектным значениям (с точки зрения пропускной способности) посредством оперативного мониторинга его рабочего состояния. Но люди-операторы всегда беспокоятся о состоянии перегрузки мельницы, поэтому они обычно эксплуатируют мельницу ниже ее оптимальных проектных значений.

Интерактивный метод нейроуправления контуром измельчения

Схема предлагаемого метода нейроуправления изображена на рис. 2. Данные собираются каждый час с помощью измерительных приборов (который регулируется в зависимости от колебаний рабочего состояния мельницы), и нейронная сеть использует эти данные для оценки рабочего состояния мельницы и, если требуется какое-либо контрольное действие, нейросеть определяет того, какую уставку следует изменить и определяет значения изменений. Рассчитанные уставки вводятся в контроллер. Следовательно, мельница будет работать в более стабильном состоянии при сохранении максимальной производительности. Основными целями оперативного нейроуправления являются стабилизация ра-

боты мельницы, максимизация производительности мельницы, снижение удельного энергопотребления, корректировка содержания твердого сырья в требуемом интервале и недопущение ошибок персонала.

Нейроуправление строится на основе обучения нейронной сети с учителем, в роли которого выступает опытный оператор мельницы, реализующий эффективное управление процессом измельчения. Контроллер, построенный на основе нейронной сети, должен работать в реальном времени и отражать теку-

щее состояние процесса измельчения. Выбор решений при решении задачи оперативного управления с использованием нейронной сети относится к классу многокритериальных задач. В предыдущей работе [16] предложен метод принятия решений, исходя из множества допустимых технических условий, накладываемых на процесс измельчения. Контроллер на основе нейронной сети был настроен с использованием данных, полученных в течение месяца (таблица) на заводе ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент».

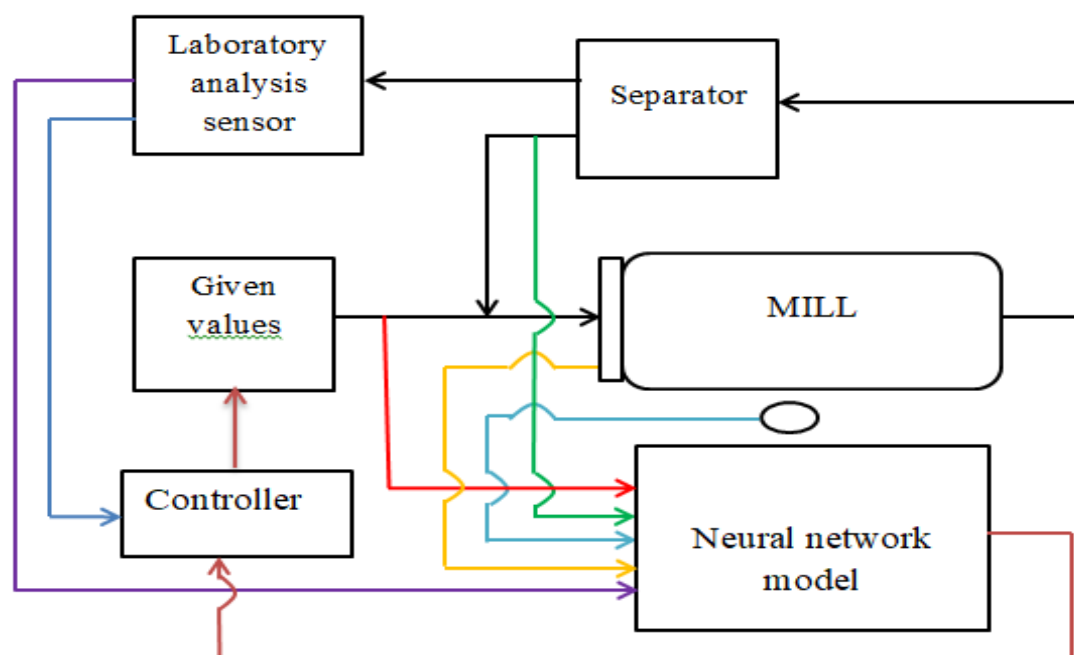


Рис. 2. Схема интерактивного метода нейроуправления контуром измельчения шихты в цементном производстве

Пример данных измельчения, собранных за день

День/ время, ч:мин	Подача (B0), т/час	Отклонено (крупка) (B2), т / час	Удельный расход электро- энергии кВт*ч/т	Блейн, см ² / г	Звук мель- ницы, дБ	Мощность двигателя мельницы, %
1/8:00	25,5	12,9	28	3820	82	79,3
1/9:00	26	11	28,1	3840	83,3	79,1
1/10:00	25,5	12,7	28,3	3885	81,9	79,3
1/11:00	26,5	12,3	28	3850	82,7	79,3
1/12:30	32,6	15	28,1	3660	86,1	74
1/13:00	34	17	29	3835	85	75,9
1/14:00	33,6	18	29,4	4105	85,7	76,1
1/15:00	30	17,3	30	3860	81,3	78,5
1/16:00	31	19,1	32	3825	80,7	78,8
1/17:00	32,6	11,8	28,9	3660	86,1	74
1/18:00	34	16,5	28,1	3835	85	75,9
1/19:00	35,6	16,8	28,3	4105	85,7	76,1
1/20:00	38,1	19,2	29,2	3860	81,3	78,5

На рис. 3 представлена компьютерная модель оперативного нейруправления процес-

сом помола клинкера при производстве цемента.

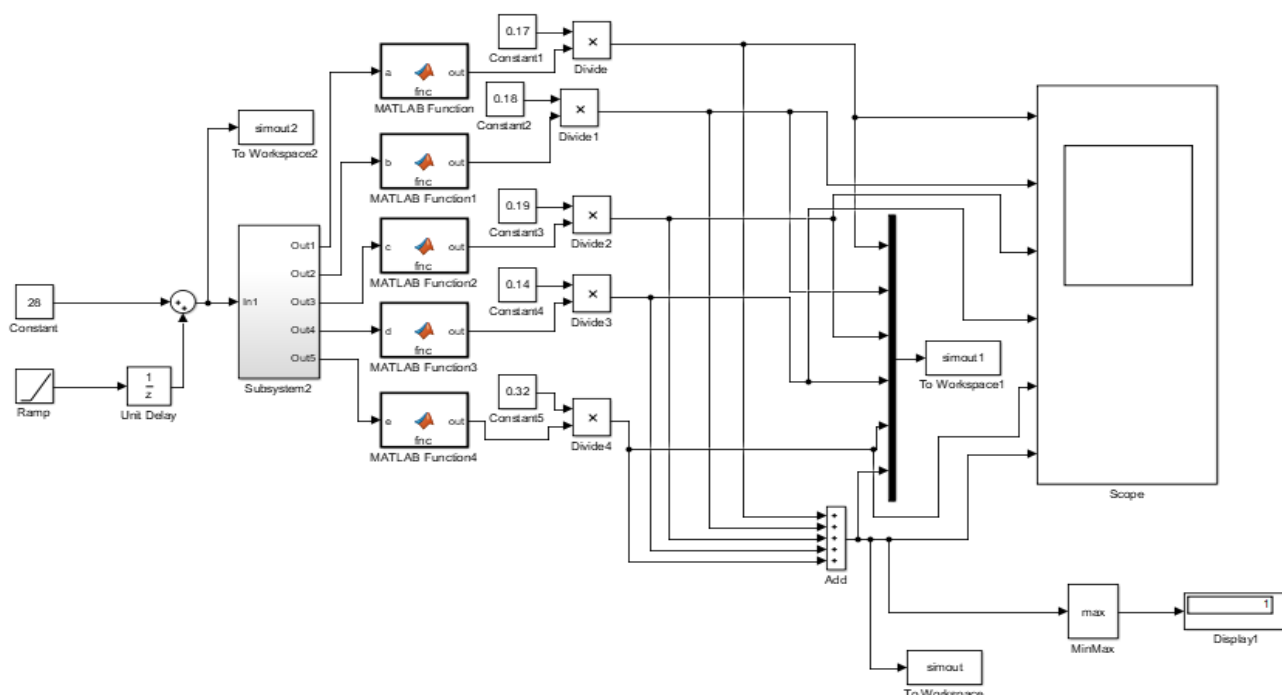


Рис. 3. Компьютерная модель оперативного нейруправления процессом помола шихты при производстве цемента

Переведенные графики получены на основе расчета текущего режима работы мельницы помола клинкера по данным завода ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент». На рис. 4 приведены желаемые целевые диапазоны изменения рассмотренных показателей по формуле:

$$C(x) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \mu_j(x),$$

где μ_i - характеристические функции целевых диапазонов изменения показателей, α_j - весовые коэффициенты, отражающие важность выполнения соответствующих целевых диапазонов изменения показателей. C – целевая функция, показывающая взвешенное число выполненных целевых диапазонов изменения показателей [17].

Как показано на рис. 4,е в данном случае максимальное значение целевой функции равно 1, что позволяет оператору выбрать объём подачи материала в мельницу в размере, предсказанном моделью оператора (т/ч.).

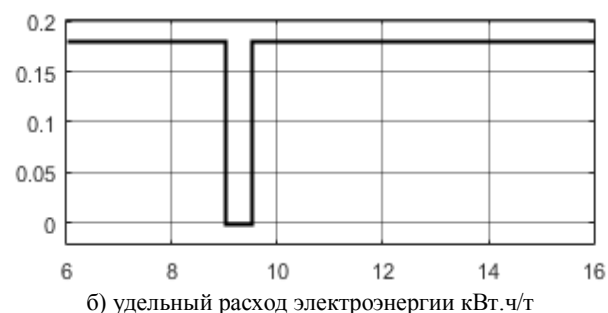
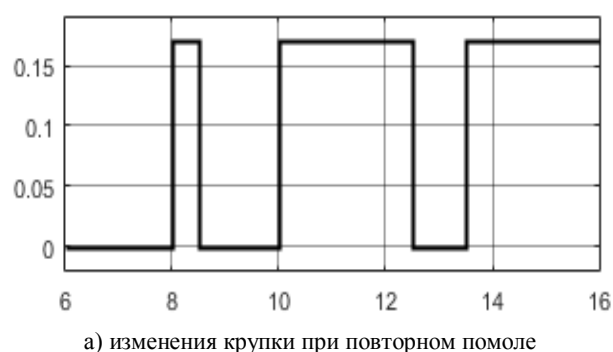


Рис. 4. Результаты применения весовых коэффициентов и желаемых целевых диапазонов

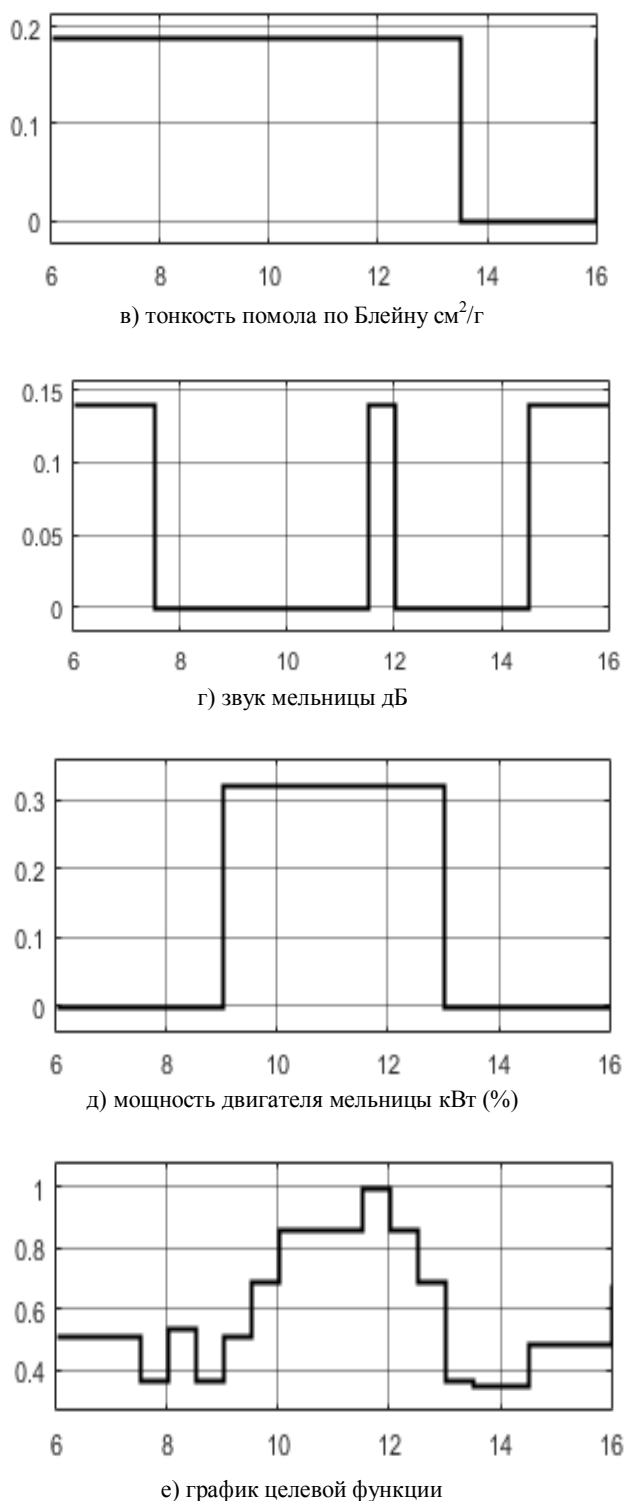


Рис. 4. Результаты применения весовых коэффициентов и желаемых целевых диапазонов (продолжение)

Заключение

Модель нейрорегулирования на основе MATLAB/Simulink с использованием встроенного пакета Neural Network и набора инструментов была разработана, проверена и подтверждена реальными эксплуатационными

данными из контура измельчения шихты в заводе ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент». В работе предложен метод принятия решений, исходя из множества допустимых технических условий, накладываемых на процесс помола. Подобная постановка задачи в общем случае является противоречивой. В работе предложен подход к решению данной задачи на основе определения максимального числа совместных взвешенных условий, налагаемых на процесс. Подобный подход позволяет организовать интерактивную процедуру выбора допустимого решения при оперативном управлении процессом помола. Результаты подтвердили способность предлагаемой системы диспетчерского управления увеличить производительность мельницы на 2,36% и одновременно снизить удельное энергопотребление на 2,29%.

Литература

1. Ciganek C., Kreysa K. Two-parameter control system for a cement grinding process, Translat. Zement-Kalk-Gips. 1991. Pp. 202–206.
2. An industrial application of multivariable linear quadratic control to a cement mill circuit / V. Van Breusegem, L. Chen, G. Bastin, V. Wertz, V. Werbrouck, C. de Pierpont // IEEE Trans. Ind. Appl. 32. 1996. Pp. 670–677.
3. Multivariable linear quadratic control of a cement mill: an industrial application / V. Van Breusegem, L. Chen, V. Werbrouck, G. Bastin, V. Wertz. Contr. Eng. 1994. Practice 2. Pp. 605–611.
4. Modeling, simulation and evaluation of control loops for a cement grinding process, in: Proceedings of European Control Conference (CD-ROM) / M. Boulvin, C. Renotte, A. Vande Wouwer, M. Remy, S. Tarasiewicz, P. Cesar. Brussels, Belgium, July 1997, Paper TH-E-H4.
5. Исмоилов М.И., Пиров Ф.С. Проблемы автоматизации предприятия по производству цемента // Методы и модели прикладной информатики: межвуз сб. науч. тр. М.: МАДИ (ГТУ), 2009. С. 116–119.
6. Magni L., Bastin G., Wertz V. Multivariable nonlinear predictive control of cement mills // IEEE Trans. Contr. Syst. Technol. 7 (1999). Pp. 502–508.
7. Robust stabilization of a nonlinear cement mill model / F. Grogard, F. Jadot, L. Magni, G. Bastin, R. Sepulchre, V. Wertz // IEEE Trans. Autom. Contr. 2001. 46 (4). Pp. 618–623.
8. Hadizadeh M., Farzanegan A., Noaparast M. A plant-scale validated MATLAB-based fuzzy expert system to control SAG mill circuits // Journal of Process Control. 2018. 70. Pp. 1–11.
9. Kandasamy W.B.V., Neelakantan N.R., Ramathilagam S. Control of grinding circuit in cement industries using fuzzy expert system // Int. Conf. Anal. Discret. Struct. 2002.
10. Ramasamy M., Narayanan S.S., Rao C.D.P. Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme // J. Process Control. 2005. 15. P. 273–283.
11. Subbaraj D.P., Anand P.S.G. Evolutionary design of intelligent controller for a cement mill process // Int. J. Comput. Appl. 2010. 1. P. 111–120.

12. An improved control strategy for ball Mill grinding circuits / X. Chen, J. Yang, S. Li, Q. Li // LSMS/ICSEE 2010, Part I, LNCS 6328. Pp. 409–415.

13. Chai T., Zhai L., Yue H. Multiple models and neural networks based decoupling control of ball mill coal-pulverizing systems // J. Process Control. 2011. 21. Pp. 351–366.

14. Zhou P., Chai T., Sun J. Intelligence-based supervisory control for optimal operation of a DCS-controlled grinding system // IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2013. 21. Pp. 162–175.

15. Control system architecture for a cement mill based on fuzzy logic / C.R. Costea, H.M. Silaghi, D. Zmaranda,

M.A. Silaghi // Int. J. Comput. Commun. Control. 2015. 10. Pp. 165–173.

16. Казаринов Л.С., Хасанов Дж.Р. Выбор решений при оперативном нейроуправлении процессом помола шихты в цементном производстве // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19. № 2. С. 128–138.

17. Казаринов Л.С., Хасанов Дж.Р. Оптимизации степени загрузки мельницы при производстве цемента // Вестник ПНИПУ. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления». 2019. Т. 30. № 2. С. 196–210.

Поступила 07.11.2019; принята к публикации 13.12.2019

Информация об авторах

Казаринов Лев Сергеевич - д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Автоматика и управление», Южно-Уральский государственный университет (454080, Россия, г. Челябинск, проспект Ленина, 76), e-mail: kazarinovls@susu.ru

Хасанов Джасурджон Рустамджонович - аспирант кафедры «Автоматика и управление», Южно-Уральский государственный университет (454080, Россия, г. Челябинск, проспект Ленина, 76), e-mail: jacur@mail.ru

INTERACTIVE METHOD OF NEURAL CONTROL OF PROCESS OF MILLING MIXTURE IN CEMENT PRODUCTION

L.S. Kazarinov, Dzh.R. Khasanov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract: an interactive method for the neurocontrol of the mixture grinding circuit is proposed for the production of cement for semi-automatic mills. In this case, the most important tasks of this system are to ensure a stable feed mode and energy saving. Neurocontrol is based on training a neural network with a teacher, the role of which is played by an experienced mill operator, which implements effective control of the grinding process. Neurocontrol calculates the optimal settings for distributed control loops based on an interactive computational procedure. This approach allows us to make effective decisions on controlling the grinding process based on the coordination of many conflicting technical conditions. The main advantage of the proposed method is that the decision-making method for choosing the values of control factors, taking into account the given technical and economic constraints, allows the operator to choose the optimal parameters for loading the mill according to many conflicting conditions, which allows one to get a quality product while minimizing the resources consumed. The controller developed on the basis of the proposed method was tested on the model of the grinding circuit for a real mill. The results confirmed the effectiveness of the proposed dispatch control system, which allowed to increase the mill productivity by 2.36% and at the same time reduce specific energy consumption by 2.29%

Key words: cement, clinker, neural network, charge, grinding process, operational control

References

1. Ciganek C., Kreysa K. "Two-parameter control system for a cement grinding process", *Translat. Zement-Kalk-Gips*, 1991, pp. 202–206.
2. Van Breusegem V., Chen L., Bastin G., Wertz V., Werbrouck V., de Pierpont C. "An industrial application of multivariable linear quadratic control to a cement mill circuit", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1996, no. 32, pp. 670–677.
3. Van Breusegem V., Chen L., Werbrouck V., Bastin G., Wertz V. "Multivariable linear quadratic control of a cement mill: an industrial application", *Contr. Eng. Practice*, 1994, no. 2, pp. 605–611.
4. Boulvin M., Renotte C., Vande Wouwer A., Remy M., Tarasiewicz S., Cesar P. "Modeling, simulation and evaluation of control loops for a cement grinding process", *Proceedings of European Control Conference (CD-ROM)*, Brussels, Belgium, July 1997, paper TH-E-H4.
5. Ismoilov M.I., Pirov F.S. "Problems of automation of an enterprise for the production of cement", *Methods and Models of Applied Informatics: interuniversity collection. scientific papers, (Metody i modeli prikladnoy informatiki: mezhvuz sb. nauch. tr.)*, MADI(GTU) Moscow, 2009, pp. 116–119.
6. Magni L., Bastin G., Wertz V. "Multivariable nonlinear predictive control of cement mills", *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, 1999, no. 7, pp. 502–508.
7. Grogard F., Jadot F., Magni L., Bastin G., Sepulchre R., Wertz V. "Robust stabilization of a nonlinear cement mill model", *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 2001, no. 46 (4), pp. 618–623.
8. Hadizadeh M., Farzanegan A., Noaparast M. "A plant-scale validated MATLAB-based fuzzy expert system to control SAG mill circuits", *Journal of Process Control*, 2018, no. 70, pp. 1–11.

9. Kandasamy W.B.V., Neelakantan N.R., Ramathilagam S. "Control of grinding circuit in cement industries using fuzzy expert system", *Int. Conf. Anal. Discret. Struct.*, 2002
10. Ramasamy M., Narayanan S.S., Rao C.D.P. "Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme", *J. Process Control*, 2005, no. 15, pp. 273–283.
11. Subbaraj D.P., Anand P.S.G. "Evolutionary design of intelligent controller for a cement mill process", *Int. J. Comput. Appl.*, 2010, no. 1, 111–120.
12. Chen X., Yang J., Li S., Li Q. "An improved control strategy for ball Mill grinding circuits", *LSMS/ICSEE 2010, Part I, LNCS 6328*, 2010, pp. 409–415.
13. Chai T., Zhai L., Yue H. "Multiple models and neural networks based decoupling control of ball mill coal-pulverizing systems", *J. Process Control*, 2011, no. 21, pp. 351–366.
14. Zhou P., Chai T., Sun J. "Intelligence-based supervisory control for optimal operation of a DCS-controlled grinding system", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2013, no. 21, pp. 162–175.
15. Costea C.R., Silaghi H.M., Zmaranda D., Silaghi M.A. "Control system architecture for a cement mill based on fuzzy logic", *Int. J. Comput. Commun. Control.*, 2015, no. 10, pp. 165–173.
16. Kazarinov L.S., Khasanov Dzh.R. "The choice of solutions for operational neurocontrol of the process of grinding the mixture in cement production", *Bulletin of SUSU (Vestnik YUUrGU)*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 128–138.
17. Kazarinov L.S., Khasanov Dzh.R. "Optimization of the degree of mill loading in cement production", *Bulletin of SUSU (Vestnik YUUrGU)*, 2019, vol. 30, no. 2, pp. 196–210.

Submitted 07.11.2019; revised 07.11.2019

Information about the authors

Lev S. Kazarinov, Dr. Sc. (Technical), South Ural State University (NRU) (76 Lenina ave., Chelyabinsk 454080, Russia), e-mail: kazarinovls@susu.ru

Dzhasurdzhon R. Khasanov, Graduate student, South Ural State University (NRU) (76 Lenina ave., Chelyabinsk 454080, Russia), e-mail: jacur@mail.ru

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕКОДЕРОВ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ
НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА MIN-SUM****М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова, А.О. Кузнецова, Т.Д. Ижокина****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: показано, как результат моделирования производительности алгоритмов декодирования может быть использован для оптимизации параметров алгоритма и что обработка с использованием метода распараллеливания может не только резко повысить производительность оценки, но может также сделать вычислительную оптимизацию алгоритмов декодирования осуществимой на практике. Представленный метод распараллеливания позволяет повысить производительность и упростить задачи вычислительной оптимизации алгоритмов декодирования. Одним из способов решения задач декодирования является применение целочисленной линейной программы. Выполнение линейного программирования для декодирования существенно зависит от используемой композиции линейного программирования. Приведены примеры моделирования некоторых алгоритмов низкоплотностного кода, также показаны результаты моделирования с использованием модифицированного алгоритма min-sum. Показано, что модифицированный алгоритм выигрывает в производительности исправления ошибок, особенно в высоком диапазоне воздействия шума. Представлен распараллеленный метод ускоренного проектирования и оптимизации работы низкоплотностных алгоритмов декодирования. С использованием разработанных критериев для оценки эффективности алгоритмов декодирования получается оптимизировать выбор параметров алгоритма с применением нелинейных методов оптимизации. Показано, что все эти действия, направленные на оптимизацию, приводят к полуавтоматической модели алгоритма

Ключевые слова: LDPC-декодирование, алгоритм декодирования, эффективность декодирования, производительность алгоритмов

Введение

Пожалуй, одной из основных проблем при передаче информации в системе связи является достоверность переданной информации по каналам с шумами. В настоящее время одним из наиболее используемых кодов для передачи цифровой информации являются LDPC (Low Density Parity Check – низкой плотности проверок на четность) коды, которые очень популярны в системе достоверной передачи данных и FEC (forward error correction – прямое исправление ошибок). Они обладают лучшей производительностью исправления ошибок по сравнению с турбо-кодами и имеют одни из лучших схем кодирования с точки зрения простоты их реализации. Для оптимизации алгоритмов декодирования и для эффективности декодирования, необходимо высокое число моделирований, что усложняет весь процесс разработки.

Несмотря на большое число исследований, проведенных относительно этих алгоритмов декодирования, по-прежнему существует достаточно много вопросов, касающихся эф-

фективности декодирования в зависимости от некоторых параметров используемого алгоритма. Эти недостатки усложняют моделирование LDPC-декодера при разработке микросхемы. По этой причине часто производительность алгоритма декодирования вычисляется путем численного моделирования изменения параметров алгоритмов вручную. Из-за вычислительной сложности алгоритмов декодирования и требования высокого уровня уверенности в результате, оценка производительности декодирования может занять очень много времени. Для оптимизации алгоритмов декодирования требуется высокое количество численного моделирования.

Декодирование LDPC-кодов

В системе связи данные передаются в приемник через канал связи и кодируются в передающем устройстве. Примерная схема системы связи с использованием низкоплотностного кода показана на рис. 1.

Одна из характеристик кода – частота проверки его на четность. В случае, если код имеет пониженную плотность проверок, то такие коды можно отнести к линейным блочным кодам с разреженной $M \times N$ проверочной

матрицей H , которая, в свою очередь, используется для формулировки некоторых характеристик кода. Двоичный линейный блочный код определяется с помощью векторов

$x \in \{0, 1\}^n$. Каждая строка матрицы проверки четности соответствует одной проверочной итерации.

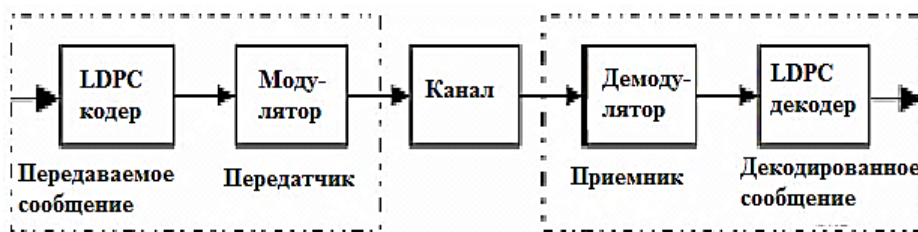


Рис. 1. Упрощенное представление системы связи с использованием LDPC-кода

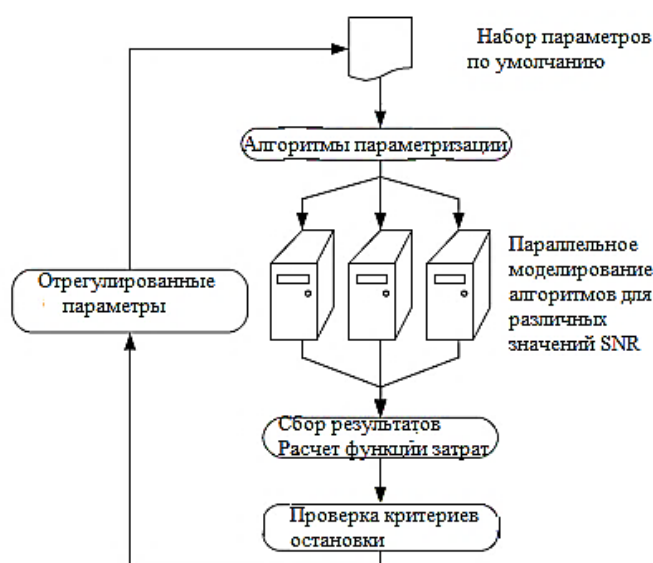


Рис. 2. Система оптимизации

Для декодирования принятой информации используются два метода, часто обсуждаемых в литературе [4]. Один из методов называется символ за символом максимального апостериорного (symbol-by-symbol maximum a posteriori – SBS-MAP) декодирования. Данный метод использует минимальную вероятность появления ошибочных бит декодированных данных. Другой метод называется максимальным декодированием последовательности правдоподобия (maximum likelihood sequence decoding – MLSD). Такой подход минимизирует вероятность появления ошибочного слова декодированных данных. Оба подхода затруднены для реализации.

По этой причине используются приближенные алгоритмы для декодирования низкоплотностных кодов. В качестве приближения декодирования используется метод «символ за символом» максимального апостериорного декодирования, который основан на алго-

ритме распространения доверия [2]. Для аппроксимации максимального декодирования последовательности правдоподобия используется подход, основанный на линейном программировании [3].

Используются два способа для решения задач декодирования с применением уравнения проверки четности. Одним из этих способов является построение двудольного графа Таннера [2]. Этот граф состоит из группы проверочных узлов и группы переменных узлов и соответствующих связей между этими группами. Декодирование с использованием алгоритма распространения доверия можно изобразить в виде передачи сообщений, которые соответствуют вероятности проверочных значений на графе Таннера. Из-за неоптимальности алгоритма изменения на графе Таннера влияют на эффективность декодирования. Эти параметры могут быть оптимизированы с помощью предложенного метода.

Вторым способом для решения задачи декодирования является использование целочисленной линейной программы. Использование дополнительных ограничений может улучшить производительность декодирования для линейного программирования [5]. Выбор таких ограничений также может быть сделан с помощью нашей системы оптимизации.

Оптимизация алгоритмов декодирования

Из-за отсутствия оптимизированных алгоритмов можно регулировать различные параметры алгоритма, влияя на производительность декодирования. В эту оптимизацию могут быть включены и другие части системы связи, например, представление в символьном виде информации с использованием модуляции, как показано в работе [6].

Здесь используется канал с аддитивным белым гауссовым шумом (AWGN). Этот канал определяется одним параметром – отношение сигнал-шум (SNR). Основная проблема состоит в том, что набор параметров часто выполняется по-разному для значений другого канала SNR . Для того, чтобы сделать оптимизацию на практически соответствующий диапазон SNR , многие моделирования должны быть сделаны с тем же набором параметров, но с разными значениями канала SNR .

Для оптимизации алгоритмов декодирования использовали структуру, показанную на рис. 2. Оптимизация начинается с выбора параметров по умолчанию. Алгоритмы итерационно выполняются с выбранным набором параметров, а затем параллельно моделируются для разных значений SNR канала. Для высокой достоверности результатов моделирования должно быть смоделировано до 10^9 кодовых слов. Производительность декодирования, полученная по результатам моделирования используется для дальнейшего выбора параметров.

Вместо использования скорости передачи ошибочного бита и слова (BER / WER) используется увеличение скорости ошибки при заданных значениях SNR в качестве производительности.

Допустим, P – чередование некоторых параметров алгоритма дешифрования. Для произведения дальнейшего расчета необходимо подсчитать потери, характерные для этого набора параметров в виде

$$c(P) = \sum_s WER_{ref}(s) - WER_{(s)}. \quad (1)$$

Таким образом происходит сравнение идеального значения WER_{ref} с полученным выражением, которое зависит от частоты ошибок слова s при данных значениях SNR , полученного с помощью алгоритма дешифрования с использованием набора параметров P .

Данный подход дает возможность совершенствовать алгоритм для SNR диапазонов: чем выше сумма WER , тем лучший получается набор параметров.

Результаты обоих типов оптимизированных алгоритмов BP и LP комбинируются с помощью весовой функции, найденной с помощью системы оптимизации.

Модифицированный алгоритм min-sum

По сравнению с оригинальной двойной проверкой алгоритма min-sum, версия одной проверки может быть не только быстрее, но также может быть более эффективной для памяти. Мы можем снизить объем памяти за счет хранения $Z_n^{(k)}$, которые имеют N элементов, вместо $Z_{mn}^{(k)}$, которые имеют $N \cdot d_v$ (средняя степень переменного узла) элементов.

Рассматривая версию аппаратной реализации, необходимо затронуть вопрос экономии памяти, что является важным параметром в случае использования алгоритма min-sum в беспроводных либо мобильных вычислительных устройствах, где объем памяти может быть не так велик. Для решения этой проблемы используется версия одной проверки, которая позволяет сохранять только адресации из контрольных узлов в переменные узлы.

Поскольку упрощенный min-sum алгоритм имеет только горизонтальную проверку, площадь схемы может быть снижена, если требуются только соединения от контрольных узлов к переменным узлам.

Для работы начального алгоритма min-sum требуется большой объем памяти, который используется в основном для хранения сообщений переменного узла $Z_{mn}^{(k)}$ и сообщений проверочного узла $L_{mn}^{(k)}$. Даже при условии, что используется одна ячейка памяти для хранения как $Z_{mn}^{(k)}$ и $L_{mn}^{(k)}$, все еще необходимо некоторое количество $\sum_n |M(n)|$ ячеек памяти. Следует помнить, что каждый ненулевой эле-

мент проверочной матрицы H требует по одной ячейке для хранения.

В случае использования b бит ($b=6 \sim 8$ на практике) для сохранения некоторого значения, которое соответствует числу ячеек памяти и определяется как $b \cdot \sum_n |M(n)|$. Использование такого объема памяти характеризуется высоким потреблением энергии из-за частого использования данных ячеек, в частности, чтение или запись.

Для решения этой проблемы необходимо понаблюдать за сообщениями проверочного узла $L_{mn}^{(k)}$, которые вычисляются с помощью горизонтальной проверки. Сообщения проверочного узла $L_{mn}^{(k)}$ вычисляются с помощью $L_{mn}^{(k)} = \prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sgn}(Z_{mn'}^{(k-1)}) \cdot \min_{n' \in N(m) \setminus n} |Z_{mn'}^{(k-1)}|$ и $Z_{mn}^{(k)} = Z_n^{(0)} + \sum_{m' \in M(n) \setminus n} L_{m'n}^{(k)}$.

Все сообщения проверочного узла $L_{mn}^{(k)}$ для одного и того же m имеют равные показатели, за исключением одного. Первое абсолютное значение – это минимальное значение $|L_{mn}^{(k-1)}|$ узла m . Второе абсолютное значение – следующее минимальное абсолютное значение $|L_{mn}^{(k-1)}|$.

Для получения более точного результата сообщений проверочного узла $L_{mn}^{(k)}$ узла m примем $A_m^{(k)}$ как первое абсолютное значение

$$A_m^{(k)} \equiv \min_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|.$$

По данным уравнения $L_{mn}^{(k)} = \prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sgn}(Z_{mn'}^{(k-1)}) \cdot \min_{n' \in N(m) \setminus n} |Z_{mn'}^{(k-1)}|$ получаем

$A_m^{(k)} \equiv \min_{n \in N(m)} |Z_{mn}^{(k-1)}|$. Данное выражение является критическим для $|Z_{mn}^{(k-1)}|$ узла m .

Допустим, $B_m^{(k)}$ - второе абсолютное значение уравнения $B_m^{(k)} \equiv \min_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|$, из чего следует, что за $\hat{n}_m^{(k)}$ следует положение $L_{mn}^{(k)}$ следующего критического абсолютного значения, $\tilde{n}_m^{(k)} \equiv \arg \max_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|$.

По данным уравнения $L_{mn}^{(k)} = \prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sgn}(Z_{mn'}^{(k-1)}) \cdot \min_{n' \in N(m) \setminus n} |Z_{mn'}^{(k-1)}|$ извлекаем $\tilde{n}_m^{(k)} = \arg \min_{n \in N(m)} |Z_{mn}^{(k-1)}|$. Таким образом, положение

следующего критического абсолютного значения $B_m^{(k)}$, $\tilde{n}_m^{(k)}$ есть позиция $Z_{mn}^{(k-1)}$ минимального абсолютного значения.

Из уравнения $Z_{mn}^{(k)} = Z_n^{(0)} + \sum_{m' \in M(n) \setminus n} L_{m'n}^{(k)}$ также имеем $B_m^{(k)} \equiv \min_{n \in N(m) \setminus \tilde{n}_m^{(k)}} |Z_{mn}^{(k-1)}|$, что является минимальным значением $|Z_{mn}^{(k)}|$ одного и того же проверочного узла m .

Пусть признак $L_{mn}^{(k)}$ будет $s_{mn}^{(k)}$, $s_{mn}^{(k)} = \text{sgn}(L_{mn}^{(k)})$. Пусть $f(A, B, n, \tilde{n})$ функция определяется как

$$f(A, B, n, \tilde{n}) = \begin{cases} B, & \text{если } n = \tilde{n}; \\ A, & \text{все остальное.} \end{cases}$$

Сообщение проверочного узла $L_{mn}^{(k)}$ может быть восстановлено из его знака $s_{mn}^{(k)}$, двух абсолютных значений $A_m^{(k)}$ и $B_m^{(k)}$ и положения $\tilde{n}_m^{(k)}$ как $L_{mn}^{(k)} = s_{mn}^{(k)} f(A_m^{(k)}, B_m^{(k)}, n, \tilde{n}_m^{(k)})$.

В алгоритме одного сканирования min-sum, подставляя вычисления $L_{mn}^{(k)}$ к вычислениям $s_{mn}^{(k)}$, $A_m^{(k)}$, $B_m^{(k)}$ и $\tilde{n}_m^{(k)}$, получаем память эффективной версии алгоритма одного сканирования min-sum.

Инициализация:

$$A_m^{(0)} = B_m^{(0)} = \tilde{n}_m^{(0)} = 0, \quad s_{mn}^{(0)} = \text{sgn}(L_n^{(0)}).$$

Горизонтальная проверка (правило обновления проверочного узла):

$$\begin{aligned} Z_n^{(k)} &= Z_n^{(0)}, \\ L_{mn}^{(k-1)} &= s_{mn}^{(k-1)} f(A_m^{(k-1)}, B_m^{(k-1)}, n, \tilde{n}_m^{(k-1)}), \\ L_{mn}^{(k)} &= \prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sgn}(Z_{mn'}^{(k-1)} - L_{mn'}^{(k-1)}) \cdot \min_{n' \in N(m) \setminus n} |Z_{mn'}^{(k-1)} - L_{mn'}^{(k-1)}| \end{aligned}$$

$$A_m^{(k)} = \min_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|, \quad (2)$$

$$B_m^{(k)} = \max_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|, \quad (3)$$

$$\tilde{n}_m^{(k)} = \arg \max_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|, \quad s_{mn}^{(k)} = \text{sgn}(L_{mn}^{(k)}).$$

Декодирование: $\hat{x}_n^{(k)} = 0$, если $Z_n^{(k)} > 0$; иначе $\hat{x}_n^{(k)} = 1$.

В памяти эффективной версии алгоритма единичного сканирования min-sum сообщения предыдущего проверочного узла $L_{mn}^{(k-1)}$ из проверочного узла m рассчитываются на лету и хранятся как временные данные во время расчета

сообщений $L_{mn}^{(k)}$ проверочного узла того же проверочного узла m . $s_{mn}^{(k)}$, $A_m^{(k)}$, $B_m^{(k)}$, $\tilde{n}_m^{(k)}$ и $Z_n^{(k)}$ являются данными, хранимыми в памяти.

Алгоритм единичного сканирования min-sum полностью эквивалентен оригинальному алгоритму min-sum. Чтобы изменить алгоритм единичного сканирования min-sum на нормализованный min-sum алгоритм, уравнения должны быть изменены

$$A_m^{(k)} = \lambda_k \min_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|, B_m^{(k)} = \lambda_k \max_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|,$$

где λ_k - константа итерации k , удовлетворяющая $0 < \lambda_k < 1$.

Чтобы заменить алгоритм единичного сканирования min-sum эквивалентным алгоритмом смещения min-sum, уравнения $A_m^{(k)} = \min_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|$ и $B_m^{(k)} = \max_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}|$ должны быть изменены на

$$A_m^{(k)} = \max(\min_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}| - \beta, 0),$$

$$B_m^{(k)} = \max(\max_{n \in N(m)} |L_{mn}^{(k)}| - \beta, 0),$$

где β – константа, удовлетворяющая $\beta > 0$.

Результаты моделирования

На рис. 3 показаны результаты моделирования с использованием подготовленной оптимальной версии сложного алгоритма LP / BP и некоторые из полученных результатов моделирования частных алгоритмов для кода LDPC.

Если судить по влиянию на снижение частоты ошибок слов, то использование комбинированного алгоритма гораздо выгоднее, чем один алгоритм. Разница особо видна в высоком диапазоне SNR.

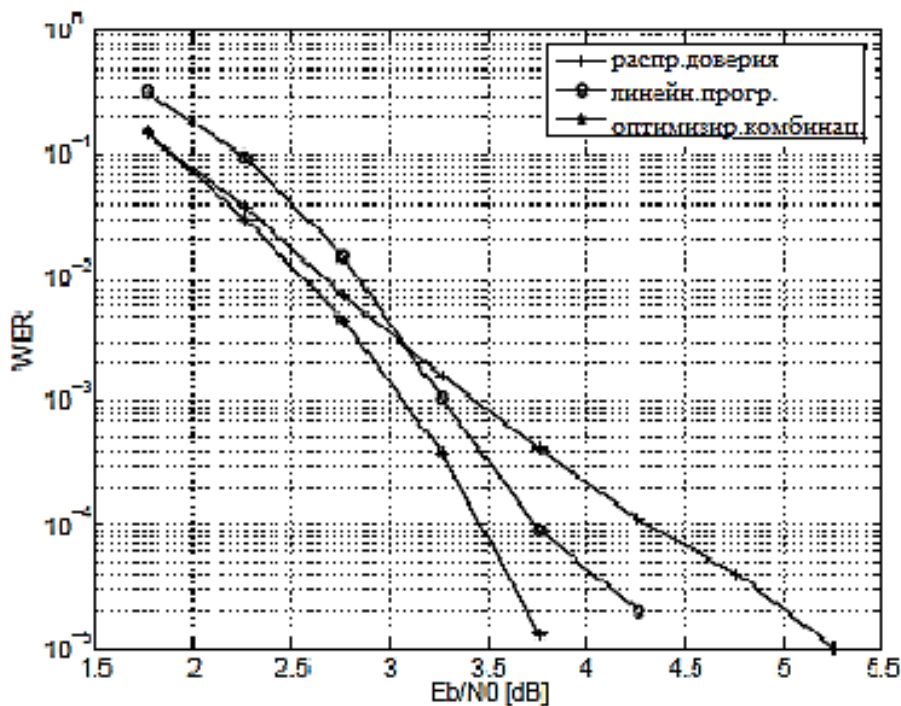


Рис. 3. Частота ошибок слов для оптимизации алгоритма декодирования

Рис. 4 показывает сравнение между выполнением Sum-Product, Min-Sum и улучшенным Min-Sum (MMS) алгоритмов. Видно, что масштабирование мягких данных не компенсирует только потери производительности

благодаря аппроксимации, но также приводит к высокой производительности по сравнению с алгоритмом Sum-Product, в связи с сокращением к завышенной оценке погрешности.

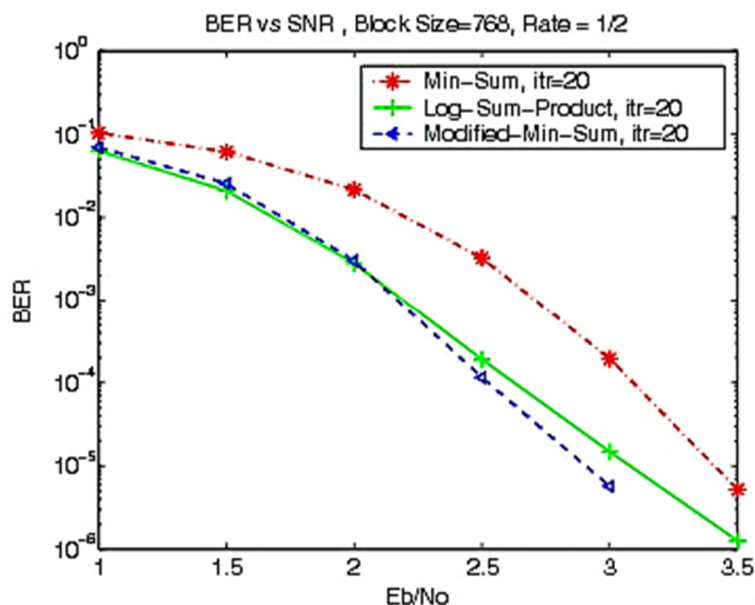


Рис. 4. Сравнение различных алгоритмов декодирования

Заключение

Представлен метод распараллеливания, позволяющий повысить производительность и упростить задачи вычислительной оптимизации алгоритмов декодирования. Одним из способов задач декодирования является использование целочисленной линейной программы. Выполнение линейного программирования для декодирования существенно зависит от используемой композиции линейного программирования. Использование дополнительных ограничений может улучшить производительность линейного программирования декодирования. Выбор таких ограничений также может быть сделан с помощью представленной системы оптимизации.

Показано, что алгоритм единичного сканирования min-sum является упрощенной версией оригинального алгоритма min-sum для декодирования низкоплотностных кодов. Он объединяет горизонтальное и вертикальное сканирование в алгоритме min-sum в одной горизонтальной развертке. Также представлено эффективное использование памяти для алгоритма одного сканирования min-sum, в котором сообщения проверочных узлов проверки сохраняются с помощью сопоставления их характеристик, а также сообщений критических абсолютных значений вместе. При этом все адаптации также используются для дешифрования LDPC-кодов в двоичной системе.

Литература

1. Design of LDPC-decoders for low error rate performance/ Z. Zhang, L. Dolecek, B. Nikolic, V. Anantharam, M. Wainwright //submitted to IEEE Trans. Comm., www.eecs.berkeley.edu/~ananth/2008+/TCOM0303.pdf
2. Lowering LDPC error floors by postprocessing/ Z. Zhang, L. Dolecek, B. Nikolic, V. Anantharam, M. Wainwright// In Proc. of Globecom. 2008. pp. 1–6.
3. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99–105.
4. Хорошайлова М.В. Verilog-описание и реализация на ПЛИС LDPC-декодера для высокоскоростной передачи данных // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 120–124.
5. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Белецкая С.Ю. Использование стохастического вычисления для реализации недвоичного LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 70–73.
6. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: учеб. пособие / под ред. Ю.Б. Зубарева. М.: Справочное издание, 2004. 126 с. ISBN 5-93517-169-4.
7. Верификация LDPC-кодов / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.С. Костюков, М.В. Хорошайлова, О.Н. Чирков // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 74–77.
8. Помехоустойчивый алгоритм декодирования ортогональных пространственно-временных блочных кодов систем ММО в замирающих каналах радиосвязи/ О.Н. Чирков, И.С. Бобылкин, И.В. Свиридова, А.А. Матвеев, М.И. Соболев // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2019. Т. 2. С. 90–92.

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Свиридова Ирина Владимировна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Кузнецова Анастасия Олеговна – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kuznecova070703@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6743-6624>

Ижокина Татьяна Дмитриевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tatyanaizhokina@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7905-3257>

OPTIMIZATION OF DESIGNING DECODERS OF LOW-DENSITY CODES BASED ON THE MODIFIED MIN-SUM ALGORITHM

M.V. Khoroshaylova, I.V. Sviridova, A.O. Kuznetsova, T.D. Izhokina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article shows how the result of modeling the performance of decoding algorithms can be used to optimize the algorithm parameters, and that processing using the parallelization method can not only dramatically increase the evaluation performance, but can also make the computational optimization of decoding algorithms feasible in practice. The presented parallelization method allows one to increase productivity and simplify the tasks of computational optimization of decoding algorithms. One way to solve decoding problems is to apply an integer linear program. The execution of linear programming for decoding substantially depends on the composition of linear programming used. Examples of modeling some low-density code algorithms are given, and simulation results using the modified min-sum algorithm are also shown. It is shown that the modified algorithm wins in error correction performance, especially in a high range of noise exposure. A parallelized method of accelerated design and optimization of low-density decoding algorithms is presented. Using the developed criteria for evaluating the efficiency of decoding algorithms, it turns out to optimize the selection of algorithm parameters using non-linear optimization methods. It is shown that all these actions aimed at optimization lead to a semi-automatic model of the algorithm

Key words: LDPC decoding, decoding algorithm, decoding efficiency, algorithm performance

References

1. Zhang Z., Dolecek L., Nikolic B., Anantharam V., Wainwright M. "Design of LDPC decoders for low error rate performance," submitted to *IEEE Trans. Comm.*, www.eecs.berkeley.edu/~ananth/2008+/TCOM0303.pdf
2. Zhang Z., Dolecek L., Nikolic B., Anantharam V., Wainwright M. "Lowering LDPC error floors by postprocessing", *Proc. of Globecom*, 2008, pp. 1–6.
3. Khoroshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2018, vol.14, no. 2, pp. 99-105.
4. Khoroshaylova M.V. "Verilog description and implementation on the FPGA LDPC decoder for high-speed data transmission", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 120-124.
5. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V., Beletskaya S.Yu. "Use of stochastic computation for realization of non-binary LDPC-decoder on FPGA", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2016, vol. 12, no 5, pp. 70-73.
6. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. ed. Zubarev Yu.B. "Interference-free coding. Methods and algorithms" ("Pomek-houstoychivoye kodirovanie. Metody i algoritmy: ucheb. posobie"), Moscow, 2004, 126 p.
7. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Kostyukov A.S., Khoroshaylova M.V., Chirkov O.N. "Verification of LDPC codes", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 74-77.
8. Chirkov O.N., Bobylkin I.S., Sviridova I.V., Matveev A.A., Sobolev M. I. "Noise-resistant algorithm of decoding orthogonal space-time block codes of MIMO systems in fading radio channels", *Proc. of the International Symposium Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, Penza State University, 2019, vol. 2, pp. 90-92.

Submitted 15.11.2019; revised 13.12.2019

Information about the authors

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, tel. 8-910-732-66-13, orcid.org/0000-0001-9167-9538

Irina V. Sviridova, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: riss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Anastasiya O. Kuznetsova, Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kuzne-cova070703@gmail.com, ORCID ID - <https://orcid.org/0000-0001-6743-6624>

Tat'yana D. Izhogina, Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tatyanaizhokina@yandex.ru, ORCID ID - <https://orcid.org/0000-0002-7905-3257>

ОЦЕНКА КАНАЛА СВЯЗИ С MIMO-OFDM СИСТЕМЫ ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ НА ОСНОВЕ СОТОВОЙ СЕТИ С СИЛЬНЫМИ ПОМЕХАМИ

О.Н. Чирков, И.М. Пашуева, Э.Э. Каграманов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: исследуется построение пилот-сигналов для оценки канала радиосвязи системы обмена данными между транспортными средствами на основе сотовой сети с MIMO-OFDM с сильными помехами в радиоканале от повторного использования спектра между различными линиями связи. Исследуемая система обмена данными между транспортными средствами на основе сотовой сети в настоящий момент рассматривается как наиболее перспективное и реализуемое решение для автомобильной связи и сетей с поддержкой 5G. Получена схема построения пилот-сигналов с повышенной помехоустойчивостью с использованием последовательности зон с нулевой корреляцией. Выведен метод оценки канала системы обмена данными между транспортными средствами на основе корреляции во временной области. В полученном методе используется последовательность зон из того же семейства, из которого выбраны символы пилот-сигнала из временной области. Помехи в многолучевом канале эффективно устраняются путем использования метода оценки на основе корреляции. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод оценки канала системы обмена данными между транспортными средствами на основе сотовой сети с сильными помехами показывает характеристики битовой ошибки от отношения сигнал/шум близкие к характеристикам канала без помех

Ключевые слова: пилот-сигнал, сотовая сеть, оценка канала, последовательность зон, корреляция, символ, помехи

Введение

Система обмена данными между транспортными средствами на основе сотовой сети (C-V2X) разработана в рамках проекта 3-го поколения (3GPP). Рассматриваемая технология направлена на подключение транспортных средств к сети с поддержкой 5G и автономное управление [1]. Средства связи C-V2X включают в себя следующие режимы: связь между транспортными средствами (V2V); связь между транспортными средствами и пешеходами (V2P) по прямому каналу; связь между транспортным средством и инфраструктурой (V2I); а также связь между транспортным средством и облачным хранением данных (V2C) через усовершенствованные сотовые каналы [2].

Цифровая схема модуляции OFDM [3] и многоантенная технология MIMO [4] широко применяются в современных сотовых сетях для улучшения характеристик приёма-передачи сигнала. Система связи между транспортными средствами на основе сотовой сети является многосотовой средой с несколькими, одновременно работающими, активными передатчиками. Из-за различных режимов связи и сложной топологии сети применение MIMO-OFDM в системах C-V2X требует точной оценки канала.

Одновременная передача данных вызывает помехи пилот-сигналов, что определенно понижает точность оценки канала. Современные методы построения пилот-сигнала и оценки канала в транспортных сетях не учитывают многосотовое строение сети. Отсюда, оценка канала связи в системе обмена данными между транспортными средствами на основе сотовой сети на основе MIMO-OFDM является актуальной и одновременно сложной проблемой разработчиков.

Существует ряд исследований, направленных на усовершенствование пилотного сигнала в многоантенной системе. Разработана схема пилот-сигнала на основе последовательностей зон для MIMO-OFDM, которая позволяет эффективно уменьшить межсотовые помехи [5]. Также предложена оптимальная схема проектирования пилот-сигналов, в которой методом наименьших квадратов (LS) [6] канала минимизируется среднеквадратичная ошибка MSE. Для полного устранения помех пилот-сигналов в многолучевом канале последовательности зон должны одновременно иметь свойства как идеальной импульсной автокорреляции (AC), так и нулевой взаимной корреляции (CC). При рассмотрении сложного сценария помех, когда система C-V2X включает в себя различные режимы связи и режимы совместного использования спектра (рис. 1), совокупные помехи будут намного выше, что приведет к значительному снижению эффективности оценки канала.

Рассмотрим вопрос построения оптимальной схемы пилот-сигналов для систем C-V2X на базе MIMO-OFDM с целью повышения помехоустойчивости, используя корреляционные свойства последовательностей зон с нулевой корреляцией (ZCZ).

Система связи C-V2X на основе MIMO-OFDM

На рис. 1 показана система связи между транспортными средствами на основе сотовой сети на основе MIMO-OFDM, которая обычно включает в себя связь V2I от базовой станции (БС) с транспортными средствами (ТС) и связь V2V между транспортными средствами.

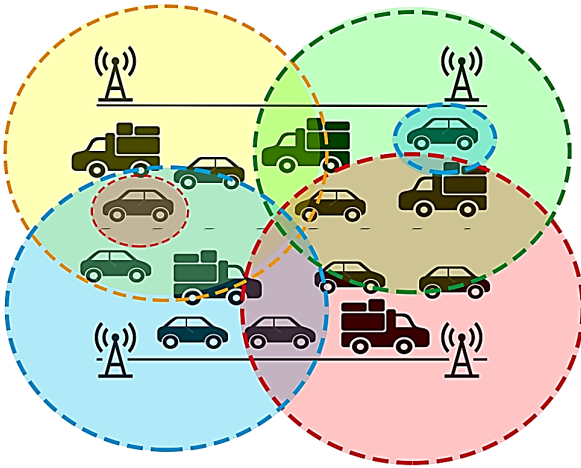


Рис. 1. Система связи C-V2X

БС и ТС оборудованы передающими N_T и приемными N_R антеннами, и $N_T > N_R$. В организации связи между транспортным средством и инфраструктурой (V2I) используются N_T передающие антенны и N_R приемные антенны. Удаленная связь между транспортными средствами (V2V) использует одинаковое количество передающих и приемных антенн - N_R . Предполагается, что в сети есть источники N_V , такие как БС и передатчики V2V-связи. В каждой приемной антенне в системах MIMO-OFDM используется одна и та же процедура оценки канала, поэтому, в качестве примера, для исследования будет использоваться только одна приемная антенна линии связи V2I. Выражения каналов связи V2V можно легко получить, заменив $\{t, N_T\}$ на $\{r, N_R\}$ в полученных результатах.

Переданный символ во временной области с циклическим префиксом на t -й передающей антенне v -го источника может быть выражен как $S_t^{(v)} = [S_t^{(v)}(N - N_g) \dots S_t^{(v)}(0) \dots S_t^{(v)}(N - 1)]$, (1)

где N_g - длина циклического префикса.

Чтобы исключить влияние помех в пилот-сигнале, длина циклического префикса должна быть $N_g > L + \tau_{max}$, где L обозначает максимальную задержку многолучевого канала, а τ_{max} обозначает максимальную зависимость времени распространения среди соседних источников [7]. N_t , N_r и N_v представляют собой наборы индексов $\{0, 1, \dots, N_t - 1\}$, $\{0, 1, \dots, N_r - 1\}$ и $\{0, 1, \dots, N_v - 1\}$ соответственно. Вектор отклика канала между t -й передающей антенной v -го источника и r -й приемной антенной целевого транспортного средства, обозначенный как $h_{t,r}^{(v)}$, $t \in N_t$, $r \in N_r$, $v \in N_v$, можно представить как

$$h_{t,r}^{(v)} = [h_{t,r}^{(v)}(0) h_{t,r}^{(v)}(1) \dots h_{t,r}^{(v)}(L - 1)]^T, \quad (2)$$

где $h_{t,r}^{(v)}(L)$ - усиление L -го пути,

$\{h_{t,r}^{(v)} | t \in N_T \text{ и } v \in N_B\}$ - набор независимых комплексных гауссовских случайных векторов, удовлетворяющих условиям $E[h_{t,r}^{(v)}] = 0_{L \times 1}$ и $E[h_{t,r}^{(v)} h_{t,r}^{(v)H}] = v_{t,r}^{(v)}$.

$$v_{t,r}^{(v)} = \begin{bmatrix} v_{t,r}^{(v)}(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & v_{t,r}^{(v)}(L - 1) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Учитывая идеальную синхронизацию по времени и компенсацию сдвига частоты на приемнике, принятый символ во временной области на r -й приемной антенне может быть представлен как

$$y_r = \sum_{v=0}^{N_v} \sum_{t=0}^{N_t} S_t^{(v)} h_{t,r}^{(v)} + n_r, \quad (4)$$

где n_r является $N \times 1$ вектор с $E[n_r] = 0_{N \times 1}$ и $E[n_r n_r^H] = N_0 I_N$.

$$\tilde{S}_t^{(v)} = \begin{bmatrix} S_t^{(v)}(0) & S_t^{(v)}(N - 1) & \dots & S_t^{(v)}(N - L + 1) \\ S_t^{(v)}(1) & S_t^{(v)}(0) & \dots & S_t^{(v)}(N - L + 2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_t^{(v)}(N - 1) & S_t^{(v)}(N - 2) & \dots & S_t^{(v)}(N - L) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Используем простой класс двоичных последовательностей зон с нулевой корреляцией (ZCZ) [7].

Пусть $F(A, B, C)$ обозначают один набор семейств двоичных последовательностей ZCZ, где A представляет длину последовательности, B - размер семейства, а C - длину зоны.

Тогда

$$F(A, B, C) = \{F_0, F_1, F_3, \dots, F_{B-1}\}, \quad (6)$$

где $F_i = [F_i(0)F_i(1)F_i(2) \dots F_i(A-1)]$, $0 \leq i \leq B-1$

Согласно исследованиям [7], можно получить

$$A = 2^{2n+m}L_0, B = 2^{n+1}, C = 2^{n+m} + 1 \quad (7)$$

где n и m - неотрицательные целые числа, а L_0 - начальная длина последовательности во время построения.

Корреляционные характеристики $F(A, B, C)$ можно представить в виде

$$R_{i,j}(\tau) = \sum_{k=0}^{N-1} F_i^*(k)F_j((k+\tau) \bmod A) = \begin{cases} L, & \text{если } i = j, \tau = 0 \\ 0, & \text{если } i = j, 0 < \tau \leq Z \\ 0, & \text{если } i \neq j, 0 < \tau \leq Z \end{cases}$$

$$i = 0, 1, \dots, B-1, j = 0, 1, \dots, B-1. \quad (8)$$

На рис. 2 и 3 представлены корреляционные характеристики $F(1024, 16, 65)$, в которых параметры построения последовательности в (7) установлены как $L_0 = 2$, $m = 3$ и $n = 3$.

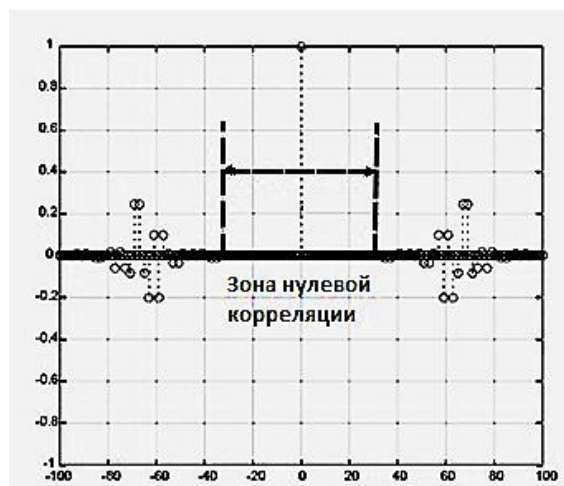


Рис. 2. Значение AC последовательностей ZCZ

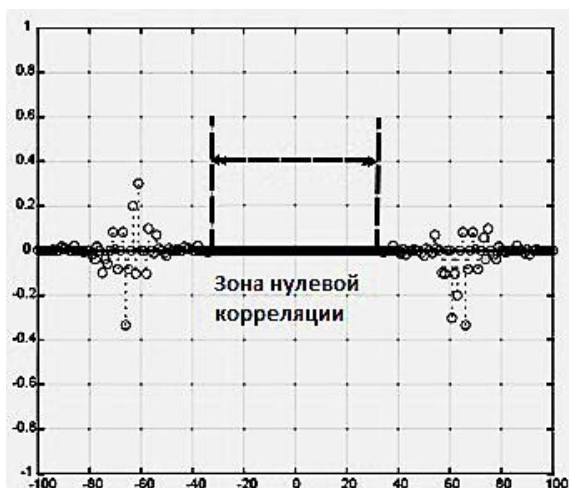


Рис. 3. Значение CC последовательностей ZCZ

На рис. 2 и 3 показано, что существует зона нулевой корреляции для значений AC и CC, где длина последовательности ZCZ равна C .

Характеристика последовательностей зон с нулевой корреляцией может использоваться для устранения помех пилот-сигнала. Выберем символы пилот-сигнала во временной области из того же набора семейств, где длина последовательности ZCZ равна длине OFDM символа с данными.

Схема повторного использования кластера пилот-сигнала в исследуемой системе показана на рис. 1, где $Q=4$ кластера последовательности зон с нулевой корреляцией. В случае связи с несколькими антеннами, такой как система MIMO [8], последовательности пилот-сигналов, назначенные разным передающим антеннам, представляют собой разные последовательности ZCZ, но в пределах одного кластера пилот-сигналов. Следовательно, каждый спроектированный пилотный кластер должен содержать как минимум N_T различных последовательностей зон с нулевой корреляцией.

Для связи V2I любые две соседние БС должны быть распределены с различными кластерами последовательности зон.

В V2V выделенный кластер последовательности зон с нулевой корреляцией конкретной линии связи должен отличаться от кластеров последовательности ZCZ, назначенных БС, в зону покрытия которых попадает транспортное средство. Следует отметить, что кластеры, назначенные для связи V2V, являются динамическими из-за мобильности транспортных средств. Если в сети нет новых БС, их выделенные кластеры могут не изменяться.

Для эффективного устранения помех пилот-сигнала в многолучевом канале в системе C-V2X длина построенных последовательностей ZCZ должна быть равна или больше длины циклического префикса.

Предложенный метод

Чтобы полностью использовать преимущества схемы проектирования пилот-сигналов на основе последовательностей ZCZ, воспользуемся методом корреляционной оценки канала временной области (TD-CCE) [7], который может эффективно устранить помехи пилот-сигнала в многолучевом канале. Метод корреляционной оценки канала временной области показан на рис. 4.



Рис. 4. TD-CCE метод

В приемнике используется взаимный коррелятор для обработки L сдвинутых локальных последовательностей ZCZ с принятым символом пилот-сигнала. Это приводит к соответствующей импульсной характеристике каждого канала.

Оценка канала на r -й антенне транспортного средства в определенной зоне, например, $v = 0$, равна

$$\hat{h}_{t_0,r}^{(0)} = \frac{1}{A} \bar{c}_{t_0}^{(0)} y_r = \frac{1}{A} \sum_{b=0}^{N_b} \sum_{t=0}^{N_t} \bar{c}_{t_0}^{(0)} \tilde{c}_t^{(b)} h_{t,r}^{(v)} + \frac{1}{A} \bar{c}_{t_0}^{(0)} n, \quad (9)$$

где $t_0 \in A_T$ и $\bar{c}_{t_0}^{(0)}$ это матрица, которая состоит из $L \times A$ сдвинутых локальных последовательностей ZCZ.

$\bar{c}_{t_0}^{(0)}$ может быть задано, как

$$\bar{c}_{t_0}^{(0)} = \begin{bmatrix} c_{t_0}^{(0)}(0) & c_{t_0}^{(0)}(1) & \dots & c_{t_0}^{(0)}(A-1) \\ c_{t_0}^{(0)}(A-1) & c_{t_0}^{(0)}(0) & \dots & c_{t_0}^{(0)}(A-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{t_0}^{(0)}(A-L+1) & c_{t_0}^{(0)}(A-L+2) & \dots & c_{t_0}^{(0)}(A-L) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Из (8) получается

$$\bar{c}_{t_0}^{(0)} \tilde{c}_t^{(b)} = \begin{cases} A I_L, & \text{если } b = 0 \text{ и } t = t_0 \\ 0_L, & \text{иначе} \end{cases} \quad (11)$$

Для оценки эффективности устранения помех пилот-сигнала в многолучевом канале и устойчивости к сильным помехам предложенного метода рассчитаем среднеквадратичную ошибку MSE на r -й антенне транспортного средства [9]

$$MSE_{t_0,r} = \frac{E \left[\text{Tr} \left\{ \left(\hat{h}_{t_0,r}^{(0)} - h_{t_0,r}^{(0)} \right) \left(\hat{h}_{t_0,r}^{(0)} - h_{t_0,r}^{(0)} \right)^H \right\} \right]}{E \left[\text{Tr} \left\{ h_{t_0,r}^{(0)} h_{t_0,r}^{(0)H} \right\} \right]} = \frac{L}{A} \frac{A_0}{\Gamma_{t_0,r}^{(0)}} \quad (12)$$

$$\Gamma_{t_0,r}^{(0)} = 2 \sum_{l=0}^{L-1} v_{t_0,r}^{(0)}, \quad (13)$$

Согласно (12), получается, что влияние помех пилот-сигнала в многолучевом канале

может быть полностью исключено с использованием предложенной схемы на основе последовательностей ZCZ и метода TD-CCE.

Результаты моделирования

Проведено моделирование предлагаемой схемы пилот-сигнала и метода TD-CCE в системе C-V2X на основе MIMO-OFDM. $N_B = 9$ (включая шесть БС и три ТС в качестве передатчиков), а каждая БС оборудована 4 передающими антеннами и каждое ТС оборудовано 2 передающими или приемными антеннами. Базовая станция размещена на участке (0, -50 м). Исследуемый объект находится на участке (-100 м, 0 м). Модель канала ITU-A - замирания в многолучевом канале [10]. Параметры моделирования приведены в таблице.

Пропускная способность системы	20 MHz
Длина ЦП	64
Количество поднесущих	1024
Частота дискретизации	20 MHz
Радиус покрытия БС	500 м
Радиус охвата ТС	50 м
Координаты БС	(-500, 50), (0, 50), (500, 50), (-500, -50), (0, -50), (500, -50) (м)
Мощность передачи БС	40 дБм
Мощность передачи ТС	15 дБм
Коэффициент потерь	$\beta = -3$
Скорость ТС	От 10 км/ч до 50 км/ч
Частота	5,9 GHz

На рис. 5 представлено сравнение предложенной схемы пилот-сигнала и оптимальной схемы с точки зрения среднеквадратичной ошибки от отношения сигнал/шум.

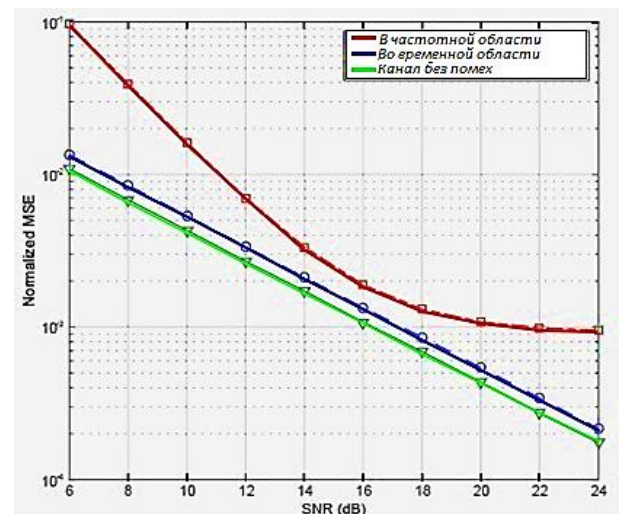


Рис. 5. MSE от отношения SNR

Из рис. 5 видно, что предложенная схема имеет значительный выигрыш в производительности по сравнению с оптимальной схемой мультиплексирования с кодовым разделением в частотной области (FD-CDM) для оценки канала в системах C-V2X.

На рис. 6 представлены результаты минимальной среднеквадратичной ошибки движущегося транспортного средства, когда оно проезжает мимо БС, расположенной в (0 м, 50 м).

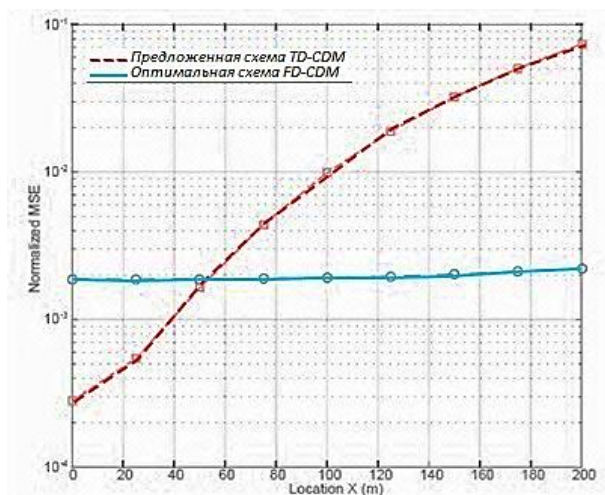


Рис. 6. MSE от отношения местоположения движущегося транспортного средства

Ось X на рис. 6 обозначает серию местоположений исследуемого транспортного средства, движущегося вдоль линии (x, 200 м). При большом значении X, т.е. близости к краю зоны покрытия БС, происходит увеличение помех от соседних БС.

Заключение

В данной статье была рассмотрена актуальная проблема проектирования пилот-сигнала и оценка радиоканала для системы C-V2X на основе MIMO-OFDM. Главной целью являлось устранение помех пилот-сигнала в условиях многолучевости и влияния соседних базовых станций и транспортных средств.

Для пилот-сигнала было предложено использовать последовательности зон с нулевой корреляцией ZCZ и повторное использование кластера. Предложенная схема мультиплексирования с кодовым разделением во временной

области (TD-CDM) имеет лучшую помехоустойчивость по сравнению с оптимальной схемой мультиплексирования с кодовым разделением в частотной области FD-CDM, которая страдает от значительного ухудшения характеристик на границах зон (рис. 1).

Таким образом, предложенный метод может быть использован в системах обмена данными между транспортными средствами на основе сотовой сети.

Литература

1. LTE evolution for vehicle-to-everything services / H. Seo, K.D. Lee, S. Yasukawa, Y. Peng, P. Sartori // IEEE Communications Magazine. Jun. 2016. Vol. 54. № 6. pp. 22-28.
2. Interference Graph-Based Resource Allocation (INGRA) for D2D Communications Underlying Cellular Networks/ R. Zhang, X. Cheng, L. Yang, B. Jiao // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2015. Vol. 64. № 8. pp. 3844-3850.
3. Чирков О.Н., Астрединов Р.К. Многополосный преобразователь частоты OFDM // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж, 2018. С. 120-124.
4. Методы помехоустойчивого обнаружения сигналов в многоантенных системах MIMO с пространственным мультиплексированием/ О.Н. Чирков, М.А. Ромащенко, И.С. Бобылкин, Р.Н. Щипелев, М.И. Соболев // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2019. Т. 2. С. 85-87.
5. Optimal pilot sequence design for multi-cell MIMO-OFDM systems / J.W. Kang, Y. Whang, H.Y. Lee, K.S. Kim // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2011. Vol. 10. № 10. pp. 3354-3367.
6. Чирков О.Н., Ромащенко М.А., Чураков П.П. Усовершенствованный метод оценки канала с итерационным подавлением помех для многопользовательских систем MIMO-OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 150-155.
7. Class of binary sequences with zero correlation zone / P. Fan, N. Suehiro, N. Kuroyanagi and X. Deng // Electronics Letters. 1999. Vol. 35. № 10. pp. 777-779.
8. Пилотная оценка канала радиосвязи в MIMO-OFDM системах/ О.Н. Чирков, М.А. Ромащенко, И.С. Бобылкин, Р.Н. Щипелев, А.А. Матвеев // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2019. Т. 2. С. 87-90.
9. Самодуров А.С. Разработка элементов программного комплекса анализа и синтеза сверхширокополосных антенн аппаратуры радиоконтроля мобильного и стационарного базирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. №7.1. С. 122-125.
10. ITU-R Recommendation M. 1225, Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000, 1997.

Поступила 24.10.2019; принята к публикации 11.12.2019

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич - старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Пашуева Ирина Михайловна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vapushka@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8218-9094>

Каграманов Эдуард Эдуардович - студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kagramanov98@yandex.ru

ASSESSMENT OF THE MIMO-OFDM COMMUNICATION CHANNEL OF DATA EXCHANGE BETWEEN VEHICLES BASED ON A CELLULAR NETWORK WITH STRONG INTERFERENCE

O.N. Chirkov, I.M. Pashueva, E.E. Kagramanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article investigates the construction of pilot signals for estimating the radio channel of a system for exchanging data between vehicles based on a cellular network with MIMO-OFDM with strong interference in the radio channel from spectrum reuse between different communication lines. The studied data exchange system between vehicles based on a cellular network is currently considered the most promising and feasible solution for automotive communications and networks with 5G support. A scheme for constructing pilot signals with increased noise immunity using a sequence of zones with zero correlation is obtained. A method for estimating the channel of a system for exchanging data between vehicles based on correlation in the time domain is derived. The obtained method uses a sequence of zones from the same family from which the pilot symbols from the time domain are selected. Noise in a multipath channel is effectively eliminated by using a correlation-based estimation. Simulation results show that proposed method for estimating channel of a system for exchanging data between vehicles based on a cellular network with strong interference shows the characteristics of the bit error from the signal-to-noise ratio close to the characteristics of the channel without interference

Key words: pilot signal, cellular network, channel estimation, sequence of zones, correlation, symbol, noise

References

1. Seo H., Lee K.D., Yasukawa S., Peng Y., Sartori P. "LTE evolution for vehicle-to-everything services", *IEEE Communications Magazine*, Jun. 2016, vol. 54, no. 6, pp. 22-28.
2. Zhang R., Cheng X., Yang L., Jiao B. "Interference graph-based resource allocation (InGRA) for D2D communications underlaying cellular networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Aug. 2015, vol. 64, no. 8, pp. 3844-3850.
3. Chirkov O.N., Astredinov R.K. "OFDM multi-band frequency converter", *Problems of Ensuring the Reliability and Quality of Instruments, Devices and Systems. Interuniversity Collection of Scientific Papers (Problemy Obespecheniya Nadezhnosti i Kachestva Priborov, Ustroystv i Sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, 2018, pp. 120-124.
4. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S., Shchipelev R.N., Sobolev M.I. "Methods of noise-tolerant signal detection in multi-antenna MIMO systems with spatial multiplexing", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, Penza State University, 2019, vol. 2, pp. 85-87.
5. Kang J.W., Whang Y., Lee H.Y., Kim K.S. "Optimal pilot sequence design for multi-cell MIMO-OFDM systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Oct. 2011, vol. 10, no. 10, pp. 3354-3367.
6. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Churakov P.P. "An improved method for channel estimation with iterative noise reduction for multi-user MIMO-OFDM systems", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 150-155.
7. Fan P., Suehiro N., Kuroyanagi N., Deng X. "Class of binary sequences with zero correlation zone", *Electronics Letters*, May 1999, vol. 35, no. 10, pp. 777-779.
8. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S., Shchipelev R.N., Matveev A.A. "Pilot assessment of the radio channel in MIMO-OFDM systems", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, Penza State University, 2019, vol. 2, pp. 87-90.
9. Samodurov A.S. "Development of elements of a software package for the analysis and synthesis of ultra-wideband antennas of radio monitoring equipment for mobile and stationary based", *Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 7-1, pp. 122-125.
10. ITU-R Recommendation M. 1225, Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000, 1997.

Submitted 24.10.2019; revised 11.12.2019

Information about the authors

Oleg N. Chirkov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Irina M. Pashueva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vapushka@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8218-9094>

Eduard E. Kagramanov, Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kagramanov98@yandex.ru

**МЕТОД ПОДОБИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ
ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ****Б.В. Матвеев¹, В.А. Иванов², А.А. Макаров²****¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия**

Аннотация: работа посвящена решению проблемы неоднозначности фазовых измерений при определении угловых координат радиоизлучающих космических аппаратов с использованием многопозиционных фазовых пеленгаторов. С этой целью рассмотрены принципы корреляционно-амплитудного и корреляционно-фазового пеленгования объектов. Указаны недостатки известных алгоритмов устранения неоднозначности фазовых измерений, во избежание которых разработана методика, основанная на выявлении подобия траекторий объекта, полученных по результатам фазовых и амплитудных измерений при послесекансной обработке. Описаны последовательные этапы проведения фазовых измерений с использованием предложенного подхода. Полученные теоретические результаты подтверждены с помощью имитационного моделирования. Реализация представленного метода подобия траекторий к устранению неоднозначности фазовых измерений проиллюстрирована на примере корреляционно-фазового пеленгатора, в котором дополнительно без увеличения аппаратуры сформирован режим корреляционно-амплитудного пеленгования. Сделан вывод об эффективности совместного применения амплитудного и фазового пеленгования для высокоточного восстановления траектории пеленгуемого объекта. Многопозиционные фазовые пеленгаторы находят применение при решении задачи высокоточного измерения угловых координат радиоизлучающих космических и других летательных аппаратов. Применение направленных следящих антенн в фазовых пеленгаторах позволяет существенно снизить требования к величине интервала однозначности фазовых измерений, выбор которого осуществляется в соответствии с шириной диаграммы направленности применяемых антенн для заданного диапазона угловых измерений

Ключевые слова: фазовые измерения, многопозиционный пеленгатор, устранение неоднозначности

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект № СП-834.2019.3)

Введение

Многопозиционные фазовые пеленгаторы (ФП) находят применение при решении задачи высокоточного измерения угловых координат радиоизлучающих космических аппаратов (РКА) [1, 2]. При этом возникает задача устранения неоднозначности фазовых измерений (ФИ), которая обычно решается применением в ФП кроме измерительной базы, обеспечивающей требуемую точность измерения (точная шкала), одной или нескольких промежуточных баз меньшей длины (промежуточная шкала), а также «виртуальных» баз [3]. Для устранения неоднозначности ФИ в [4] предложены оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы.

Кроме оптимальных алгоритмов для устранения неоднозначности ФИ находят применение эвристические алгоритмы, такие как алгоритм последовательного устранения неоднозначности ФИ от одной базы к другой [3-5]. Характерной особенностью метода последовательного устранения неоднозначности ФИ яв-

ляется определение полного числа периодов разности фаз на i -й базе только по результатам измерений на $(i-1)$ -й и i -й базах.

Любой из перечисленных алгоритмов обеспечивает устранение неоднозначности в некотором интервале угловых секторов – интервале однозначности, размеры которого зависят от расположения и диаметра антенн ФП и длины волны источника радиоизлучения (РИ), и нуждается в целеуказаниях, если источник находится вне этого интервала. Ниже предложен подход, позволяющий преодолеть указанные трудности.

Постановка задачи

Оптимальное использование направленных антенн в ФП достигается при соответствии размеров зоны обнаружения сигнала (по амплитуде) величине интервала однозначных фазовых измерений.

Параметры антенны (диаметр зеркала, ширина ДН) выбираются, исходя из требований по чувствительности и пространственной селекции, тогда как параметры антенного поля ФП –

исходя из заданных точностей и необходимости обеспечения однозначности фазовых измерений, по крайней мере, в пределах главного лепестка ДН антенны. При фиксированной расстановке антенн «угловые размеры» интервала однозначных фазовых измерений для каждой базы зависят от положения объекта на верхней полусфере. Они минимальны при наблюдении объектов, расположенных на направлениях, перпендикулярных базе ФП, и для двухшкального ФП определяются из соотношения:

$$\gamma_u = \lambda q / B_{PS}, \quad (1)$$

где γ_u – размер углового сектора однозначных фазовых измерений, λ – длина волны принимаемого сигнала, q и p – коэффициенты сопряжения шкал, $p/q = B_{IS}/B_{PS}$ – коэффициент перехода, B_{PS} – длина базы точной шкалы ФП, B_{IS} – длина базы промежуточной шкалы ФП.

Условие выполнения автономных однозначных угловых измерений с помощью двухшкального ФП с направленными антеннами по критерию обнаружения сигнала в пределах ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны по уровню -3 дБ имеет вид:

$$B_{PS} \leq q d_A, \quad (2)$$

где d_A – диаметр антенн ФП.

Условие (2) предполагает, что объект находится в центральной части ДН. При обнаружении объекта вне указанных границ могут возникнуть аномальные ошибки, обусловленные ограниченной величиной интервала однозначных фазовых измерений. Поэтому для автономной работы ФП необходимо принять меры, существенно снижающие риск получения аномальных результатов.

Корреляционно-амплитудное пеленгование

Для расширения зоны достоверных и точных угловых измерений на всю верхнюю полусферу предлагается дополнительно к фазовому методу использовать метод амплитудной пеленгации источника сигнала [5].

Наличие в составе ФП нескольких одинаковых направленных антенн предоставляет возможность амплитудной пеленгации объекта в пределах их диаграмм направленности практически без привлечения дополнительных технических средств путем разведения антенн. На рис. 1 приведена схема расположения ДН для пяти антенн A1-A5 фазового пеленгатора в «картинной» плоскости при амплитудном пеленговании объекта.

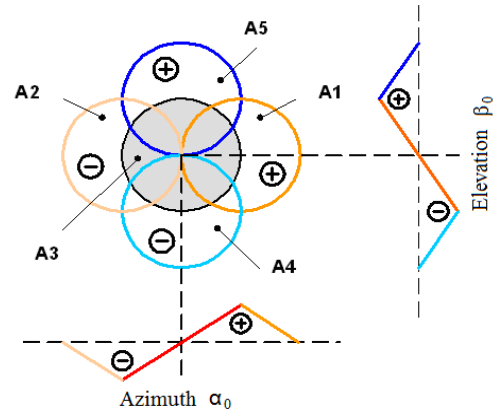


Рис. 1. Схема расположения ДН пяти антенн ФП в «картинной» плоскости при амплитудном пеленговании объекта

Если закон модуляции сигнала источника РИ неизвестен, то для реализации амплитудного пеленгатора с разнесенными антеннами целесообразно использовать взаимно-корреляционный прием. Такой измеритель угловых координат будем называть корреляционно-амплитудным пеленгатором (КАП). При этом амплитудные измерения выполняются одновременно с фазовыми измерениями и используют общие приемные каналы. Пеленгационные характеристики в режиме КАП приведены на рис. 2.

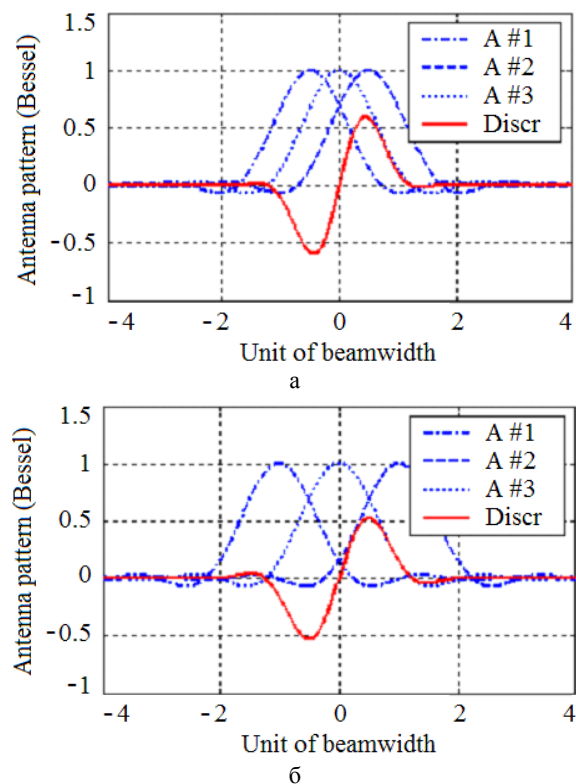


Рис. 2. Пеленгационные характеристики пятиантенного КАП: а – сдвиг A1, A2 (A4, A5) на 0,5 ДН; б – сдвиг A1, A2 (A4, A5) на 1,0 ДН

При проведении сеанса измерений угловых координат фазовым пеленгатором с направленными следящими антеннами процедура устранения неоднозначности, как правило, производится однократно в начале сеанса [2-4].

В дальнейшем ведется автосопровождение по фазовой информации. При неизвестном законе модуляции сигнала источника РИ эффективным является применение взаимно-корреляционного приема (режима корреляционно-фазовой пеленгации). Ошибка устранения неоднозначности ФИ проявляется в постепенном увеличении ошибки фазового автосопровождения РКА, при этом объект постепенно выходит из ДН антенн, вплоть до срыва автосопровождения.

Наличие режима КАП позволяет контролировать процесс фазового автосопровождения. На участке значимых ошибок сопровождения, соизмеримых с интервалом неоднозначности, следует повторить устранение неоднозначности по той базе, где условия наиболее подходящие (т.к. вероятность правильного устранения неоднозначности для одной базы выше, чем для другой, кроме случая равенства направляющих косинусов к каждой измерительной базе).

Если решение о повторном устранении неоднозначности принимается при отсутствии априорной информации о траектории РКА, то использование в качестве целеуказаний для ФП данных амплитудного пеленгатора не обеспечивает требуемой точности. Это приводит к невозможности исправления ошибки устранения неоднозначности в процессе фазового автосопровождения.

Метод подобия траекторий

Рассмотрим работу фазового пеленгатора, измерительные базы которого располагаются вдоль осей X и Z правой системы координат (ось X направлена на север, а ось Y по местной вертикали), в режиме автосопровождения по амплитудной информации с одновременной синхронной записью всей фазовой информации. Для устранения неоднозначности при послесеансной обработке предлагается использовать метод "подобия траекторий". Сущность метода состоит в том, что в заданном интервале возможных значений целого числа фазовых циклов для выбранных оптимальных по каждой измерительной базе точек выбираются такие значения, при которых траектория объекта, измеренная амплитудным методом, подобна (параллельна) траектории, рассчитанной по полной фазовой информации. Под траекторией в данном случае

подразумеваются временные последовательности значений азимута и угла места объекта.

Фазовые измерения с использованием предложенного подхода к устранению неоднозначности включают в себя следующие операции.

1. Сопровождение объекта фазовым пеленгатором в режиме корреляционно-амплитудного пеленгования и запоминание массива отсчетов угловых координат (азимута α и угла места β) объекта по результатам амплитудной пеленгации.

2. Запоминание массива фазовых отсчетов Φ_{PSx} и Φ_{PSz} на точных базах X и Z фазового пеленгатора синхронно с запоминанием отсчетов угловых координат α , β корреляционно-амплитудного пеленгатора.

3. По окончании сеанса выполняется спрямление отсчетов Φ_{PSx} , Φ_{PSz} за время измерений (сеанса). Процедура спрямления восстанавливает неразрывность массивов фазовых отсчетов Φ_{PSx} , Φ_{PSz} , представляющих собой в общем случае «пилообразную» последовательность результатов измерений фазовых сдвигов принятых сигналов объекта, где каждое измерение находится в интервале $0-2\pi$ (дробная часть полной разности фазового сдвига).

4. Формирование сглаженных отсчетов $\bar{\Phi}_{PSx}$, $\bar{\Phi}_{PSz}$ и $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$ для спрямленных отсчетов фазы $\bar{\Phi}_{PSx}$, $\bar{\Phi}_{PSz}$ и угловых координат α , β .

5. Определение в массиве $\bar{\beta}$ минимального значения угла места объекта β_0 и соответствующего ему значения азимута α_0 .

6. Оценка целого числа фазовых циклов N_{PSx} , N_{PSz} для соответствующих фазовых отсчетов $\bar{\Phi}_{PSx}$, $\bar{\Phi}_{PSz}$ с использованием угловых координат α_0 , β_0 , полученных в режиме корреляционно-амплитудной пеленгации в этой же временной точке.

Оценка целого числа фазовых циклов N_{PSx} , N_{PSz} выполняется путем пересчета угловых координат α_0 , β_0 в фазы ортогональных баз антенного поля фазового пеленгатора:

$$N_{PSx} = \{B_{PSx} K_x / \lambda\}, \quad N_{PSz} = \{B_{PSz} K_z / \lambda\}, \quad (3)$$

где $K_x = \cos \alpha_x = \cos \beta_0 \cos \alpha_0$ — направляющий косинус с осью X, $K_y = \cos \alpha_z = \cos \beta_0 \sin \alpha_0$ — направляющий косинус с осью Z, $\{ \}$ — операция взятия целой части числа.

7. Восстановление с учетом целого значения найденных фазовых циклов N_{PSx} , N_{PSz} массивов фазовых отсчетов сигнала:

$$\Phi'_{PSx} = N_{PSx} + [\bar{\Phi}_{PSx}], \quad \Phi'_{PSz} = N_{PSz} + [\bar{\Phi}_{PSz}], \quad (4)$$

где $[\Phi_{PSx}]$, $[\Phi_{PSz}]$ – дробная часть массивов сглаженных фазовых отсчетов по осям X и Z.

8. Пересчет восстановленных массивов фазовых отсчетов Φ'_{PSx} , Φ'_{PSz} в массивы значений азимута α' и угла места β' .

9. Вычисление невязок $dEl = \beta' - \bar{\beta}$, $dAz = \alpha' - \bar{\alpha}$ между рассчитанными значениями α' , β' и сглаженными значениями результатов измерений угловых координат $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$ в процессе сеанса.

10. Операции 6-9 повторяют, изменяя значение N_{PSx} , N_{PSz} в обе стороны от значений, найденных для точки α_0 , β_0 , на интервале, определяемом ожидаемой ошибкой измерения угловых координат в режиме корреляционно-амплитудного пеленгования (ошибкой определения α_0 , β_0).

11. Из полученных массивов невязок dEl , dAz выбирается такая пара значений N_{PSx} , N_{PSz} , при которой отклонение невязок составит постоянную величину на всем сеансе измерений. Эффективность устранения неоднозначности при использовании метода подобия траекторий исследовалась путем математического моделирования в среде MATLAB, результаты которого приведены на рис. 3.

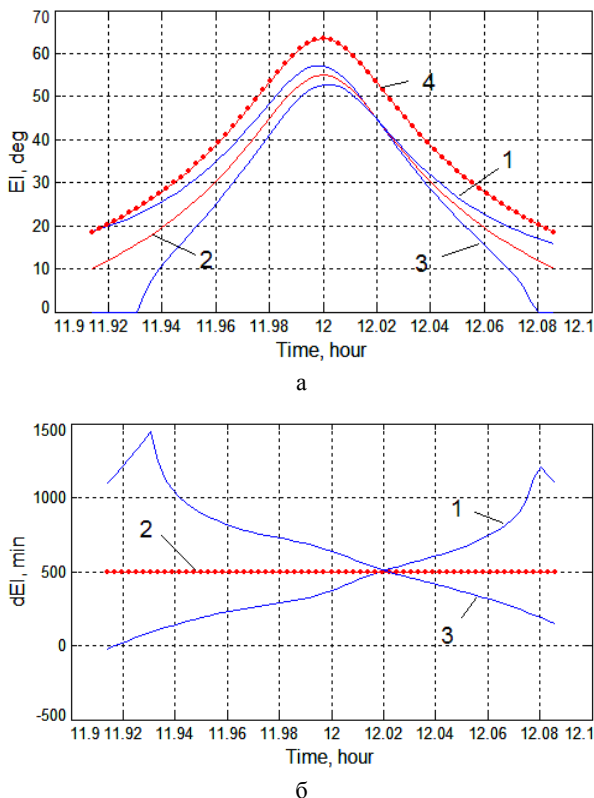


Рис. 3. Результаты измерений угла места КАП и КФП (а) и невязки по углу места между измерениями КАП и КФП (б)

Моделирование выполнялось при следующих параметрах орбиты РКА: высота круговой орбиты – 800 км, высота кульминации – 55 град, азимут кульминации – 225 град. Минимальный угол наблюдения объекта равен 10 град, частота сигнала источника радиоизлучения 4 ГГц. Устранение неоднозначности фазовых измерений проводится по базе $B_{PS} = 50$ м.

На рис. 3а кривые 1, 3 соответствуют траекториям объекта (углам места) по результатам фазовых измерений при ошибке устранения неоднозначности в ± 50 фазовых циклов, кривая 2 – траектории объекта по результатам фазовых измерений при ошибке устранения неоднозначности в 0 фазовых циклов, кривая 4 – траектории объекта по результатам амплитудных измерений при наличии ошибки пеленгования. На рис. 3б кривые 1, 3 показывают невязки по углу места между амплитудными (рис. 3а, кривая 4) и фазовыми (рис. 3а, кривые 1, 3) измерениями; кривая 2 – невязку при правильном устранении неоднозначности.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы. Подбор целого числа фазовых циклов позволяет свести до постоянного значения невязку между результатами измерений угловой координаты в режимах корреляционно-фазового и корреляционно-амплитудного пеленгования. Наибольшая величина невязки наблюдается при малых углах места, где и целесообразно выполнять устранение неоднозначности фазовых измерений.

Заключение

Комплексное использование амплитудного и фазового пеленгования в многопозиционном пеленгаторе позволяет по-новому подойти к решению задачи устранения неоднозначности фазовых измерений, базирующемуся на подобии траекторий, полученных при одновременном фазовом и амплитудном пеленговании.

Метод подобия траекторий применим при пеленгации РКА, направление на которые меняется относительно направлений баз пеленгатора на величину, обеспечивающую оптимальные точки устранения неоднозначности для обеих измерительных баз фазового пеленгатора.

Литература

1. Мониторинг космических аппаратов на основе применения корреляционно-фазовых пеленгаторов / А.С. Чеботарев, А.О. Жуков, Ю.Ю. Махненко, З.Н. Турлов. М.: Физматлит, 2011. 120 с.
2. Kawase S. Radio-interferometer for geosynchronous orbit survey // International Symposium on Space Flight Dynamics: proceedings. Munich, Germany, October 11-15, 2004. ESA SP, No. 548. P. 271-276.

3. Карманов Ю.Т., Залыцкая И.И. Устранение неоднозначности измерения пеленгов в малобазовых широкодиапазонных пеленгаторах путем алгоритмического формирования дополнительных «виртуальных» баз // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2015. Т. 15. № 1. С.11-15.

4. Денисов В.Н., Дубинин Д.В. Фазовые пеленгаторы. Томск: ТУСУР, 2002. 251 с.

5. Yang H., Kim S., Chun S. Bearing accuracy improvement of the amplitude comparison direction finding equipment by analyzing the error // International Journal of Communication Networks and Information Security. 2017. Vol. 7. No. 2. P. 80-87.

Поступила 16.09.2019; принята к публикации 09.12.2019

Информация об авторах

Матвеев Борис Васильевич – канд. техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: matveevzvaf@mail.ru

Иванов Владимир Алексеевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: ivanovva@mpei.ru

Макаров Александр Андреевич – аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: al.an.makarov@mail.ru

TRAJECTORY SIMILARITY METHOD FOR DISAMBIGUATING PHASE MEASUREMENTS

B.V. Matveev¹, V.A. Ivanov², A.A. Makarov²

¹**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

²**National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia**

Abstract: the paper is devoted to solving the problem of phase measurement disambiguation in determining the angular coordinates of radio space crafts applying multi-position phase direction finders. For this purpose, we considered the principles of amplitude correlative and phase correlative direction finding of objects. The article describes the disadvantages of the common algorithms for phase measurement disambiguation. In order to overcome them, the method is developed based on identifying the similarity of the object trajectories obtained from the results of phase and amplitude measurements during the post-session processing. The consecutive stages of phase measurements using the introduced approach are described. The theoretical results obtained are confirmed by simulation. The implementation of the presented trajectory similarity method for phase measurements disambiguation is illustrated by the example of the phase correlative direction finder for which the amplitude correlative direction finding mode is activated without any hardware changes. The conclusion is drawn on the efficiency of the combined application of amplitude and phase direction finding for high-precision restoration of the examined object trajectory. Multi-position phase direction finders are used to solve the problem of high-precision measurement of the angular coordinates of radio-emitting spacecraft and other flying objects. The use of directional tracking antennas in phase direction finders can significantly alleviate the requirements for the magnitude of the unambiguity interval of phase measurements, the choice of which is carried out in accordance with the width of the directional diagram of the used antennas for a given range of angular measurements

Key words: phase measurements, multi-position direction finder, disambiguation

Acknowledgments: the work was financially supported by the Grants Council of the President of the Russian Federation (project No. SP-834.2019.3)

References

1. Chebotarev A.S., Zhukov A.O., Makhnenko Yu.Yu., Turlov Z.N. "Spacecraft monitoring based on the application of phase correlative direction finders" ("Monitoring kosmicheskikh apparatov na osnove primeneniya korrelyatsionno-fazovykh pelengatorov"), Moscow, Fizmatlit, 2011, 120 p.
2. Kawase S. "Radio-interferometer for geosynchronous orbit survey", *Proceeding of the International Symposium on Space Flight Dynamics*, Munich, Germany, October 11-15, 2004, ESA SP, No. 548, pp. 271-276.
3. Karmanov Yu.T., Zalyatskaya I.I. "Disambiguation of measurement of bearings in lessbases widerange direction finders by algo-rithmic creation of additional "virtual" base", *Bulletin of the South Ural State University, Series "Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics" (Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Kompiyuternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika")*, 2015, vol. 15, no. 1, pp.11-19.
4. Denisov V.N., Dubinin D.V. "Phase direction finders" ("Fazovye pelengatory"), Tomsk, TUSUR, 2002, 251 p.
5. Yang H., Kim S., Chun S. "Bearing accuracy improvement of the amplitude comparison direction finding equipment by analyzing the error", *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 80-87.

Submitted 16.09.2019; revised 09.12.2019

Information about the authors

Boris V. Matveev, Cand. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: matveevzvaf@mail.ru

Vladimir A. Ivanov, Cand. Sc. (Technical), Senior Staff Scientist, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia), e-mail: ivanovva@mpei.ru

Aleksandr A. Makarov, Graduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia), e-mail: al.an.makarov@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ С РЕШАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, Д.А. Пухов, А.С. Демихова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описывается практически реализуемый метод стохастического кодирования, который для системы любых двоичных каналов обеспечивает достаточно малую вероятность необнаруживаемой ошибки. Целью анализа являются системы, в которых канал связи обеспечивает передачу сигналов от передающего пункта к приёмному с минимальными искажениями. Практическое искажение сигналов в реальных каналах связи неизбежно, так как каналы подвержены воздействию различного рода помех, характер которых может часто изменяться. В работе рассматривается система двоичных каналов, которая будет осуществлять переспрос кодовых блоков с обнаруженными ошибками для увеличения качества сигнала. Одним из самых важных условий передачи данных является передача высокой четкости сигнала, так как появление ошибок в коде искажает информацию и может привести к нарушению процесса работы устройства. Рассматривается установка двоичных каналов, в которой все ошибки канала аддитивные. Для преобразований, которые помогут сохранить целостность информации, рассматривают два этапа. На первом этапе метод стохастического кодирования обеспечивает выполнение сохранения сигнала только для канала с аддитивными ошибками. Вторым этапом является стохастическое преобразование, сводящее произвольный двоичный канал к каналу с аддитивным шумом. Оба эти преобразования должны быть взаимно независимыми, иначе их можно рассматривать как одно преобразование, если эти коды используются в системе с решающей обратной связью, то аддитивный канал не будет уменьшать среднюю скорость передачи информации

Ключевые слова: стохастическое кодирование, двоичный канал с шумом, система с решающей обратной связью, целостность информации, сигнал, аддитивный канал

Введение

При обработке и передаче информации, как правило, сигнал находится в не защищенном виде. В этих процессах система наиболее всего уязвима и склонна к ошибкам. Наблюдать вероятность ошибочного блока приема можно в двоичном канале с шумом.

Система с обратной решающей связью

Возьмем для примера систему, в которой обратная связь является решающей. В ней осуществляется переспрос кодовых блоков с обнаруженными ошибками и используется (n, k) -код. Существует множество способов создания этой системы: с адресным переспросом, блокировкой и т.д. В каждой из этих систем точность передаваемой информации потребителю напрямую зависит от вероятности не обнаруживаемой ошибки данным кодом $p_{\text{но}}$, а от относительной скорости k/n используемого кода и вероятности безошибочного приема кодового блока в прямом и обратном каналах $p_{\text{бо}}$.

Из-за большого множества дискретных каналов образуется проблема с построением универсального кода, гарантирующего в любых канальных связях обеспеченную некоторую величину $p_{\text{но}}$ при заданных значениях параметров k и n . Скорость передачи информации напрямую зависит от вида канала, потому что для некоторых каналов она может приближаться почти к 0. При малых значениях величины $p_{\text{но}}$ пользователь будет получать не искажённую информацию, а если скорость начинает падать, то это служит сигналом того, что нужно использовать другой канал связи.

В двоичном канале с аддитивным шумом существует некий систематический код (n, k) - код, обеспечивающий выполнение выражения

$$p_{\text{но}} \leq \frac{1}{2^{n-k}}. \quad (1)$$

Но все же это не является доказательством того, что есть один единственный вариант кода, в котором неравенство (1) выполнялось бы в любом двоичном канале с аддитивным шумом.

Из доказательства неравенства (1) видно, что оно верно и при выборе случайного кода, что равносильно выбору первичных матриц, которые содержат $k \times (n - k)$ двоичных элементов. Кроме этого, неравенство (1) - на слу-

чай использования каналов с неаддитивным шумом.

Описание способа кодирования

В первом этапе можно предположить, что все ошибки канала аддитивны. Из этого следует, что вероятность приема последовательности ϑ_j , если передана ϑ_i , которая, в свою очередь, зависит от поразрядной суммы ϑ_j и ϑ_i по mod2. Из этих действий составим стохастический код, удовлетворяющий (1). Во втором этапе будет выявлено, что с помощью стохастического преобразования произвольного двоичного канала можно изменить симметричный канал с аддитивными ошибками. Соблюдая эти два важных условия, выполняется неравенство (1).

Этап 1

Каждый стохастический преобразователь, отображающий случайным образом множество двоичных последовательностей длины n в себя, полностью определяется матрицей порядка $2^n \times 2^n$ условных вероятностей перехода этих последовательностей друг в друга.

Ограничимся далее случайным преобразованием, обладающим следующими свойствами

1. Реализация π_s каждого преобразования однозначно определяется набором γ_s , $s = 1, 2, \dots, 2^n - 1$ вектор - параметров и является взаимно однозначным отображением множества двоичных последовательностей длины n в себя.

2. Для каждой реализации γ_s преобразование π_s является дистрибутивным относительно поразрядного суммирования по mod2, т.е. $\pi_s(\vartheta \oplus \vartheta') = \pi_s \vartheta \oplus \pi_s \vartheta'$, $s = 1, 2, \dots, 2^n - 1$ для любых ϑ и ϑ' .

3. Если вектор-параметры γ_s и $\gamma_{s'}$ различны, то $\pi_s \vartheta \neq \pi_{s'} \vartheta$ и $\pi_s^{-1} \vartheta \neq \pi_{s'}^{-1} \vartheta$ для любых последовательностей $\vartheta \neq 0$ (т. е. для ϑ , не состоящих из всех нулей).

4. Вероятности всех $2^n - 1$ наборов вектор - параметров одинаковы и равны $1/(2^n - 1)$.

Рассмотрим далее следующую систему связи: информационные символы источника преобразуются в комбинации некоторого систематического (n, k) -кода, эти комбинации подвергаются стохастическому преобразованию π_s , удовлетворяющему свойствам 1-4, и

подаются в канал связи, где они складываются с аддитивной помехой; на приемной стороне предполагается известной реализация случайных вектор - параметров γ_s , поэтому известно и обратное преобразование $\pi_{s^{-1}}$, которому и подвергаются принимаемые блоки длины n , после чего производится обнаружение ошибок (n, k) -кодом. Известно, что вероятность не обнаруживаемой ошибки всегда равна вероятности того, что в канале связи некоторое кодовое слово ϑ_i перейдет в другое кодовое слово ϑ_j . Если фиксировать кодовое слово ϑ_i и преобразование π_s , то в канале с аддитивным шумом эта вероятность будет, очевидно, равна вероятности появления такого образца ошибки e , что $\pi_s^{-1}(\pi_s \vartheta_i \oplus e) = \vartheta_j \neq \vartheta_i$. Суммируя эти вероятности по различным $\vartheta_j \neq \vartheta_i$ и усредняя их по всем кодовым словам и реализациям преобразований π_s , получаем, с учетом свойства 4, что

$$p_{\text{но}} = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{i=1}^{2^k} p(\vartheta_i) \sum_{s=1}^{2^n-1} \sum_{j \neq i} p\{e: \pi_s^{-1}(\pi_s \vartheta_i \oplus e) = \vartheta_j\}, \quad (2)$$

где $p(\vartheta_i)$ – вероятность появления i -го кодового блока.

При любых фиксированных ϑ_i , ϑ_j и γ_s существует единственный образец ошибки e , для которого $\pi_s^{-1}(\pi_s \vartheta_i \oplus e) = \vartheta_j$. Кроме того, для различных реализаций π_s эти образцы ошибок всегда будут различными. Первое из этих утверждений следует из свойства 1. Для доказательства второго предположим противное, т.е. что существуют различные γ_s и $\gamma_{s'}$, для которых $\pi_s^{-1}(\pi_s \vartheta_i \oplus e) = \pi_{s'}^{-1}(\pi_{s'} \vartheta_i \oplus e)$. Но тогда по свойству 2 преобразования π_s получаем из предыдущего равенства, что $\pi_s^{-1}e = \pi_{s'}^{-1}e$, а так как $\vartheta_j \neq \vartheta_i$ и, следовательно, $e \neq 0$, то по свойству 3 последнее равенство невозможно.

Из доказанных утверждений немедленно следует, что при фиксированных ϑ_j и ϑ_i

$$\sum_{s=1}^{2^n-1} p\{e: \pi_s^{-1}(\pi_s \vartheta_i \oplus e) = \vartheta_j\} \leq 1 \quad (3)$$

а так как число различных кодовых слов ϑ_j , отличных от фиксированного слова ϑ_i , равно $2^k - 1$, то, меняя порядок суммирования по s и по j , в (2) из (3) получаем оценку $p_{\text{но}}$ для системы связи, использующей стохастические преобразования со свойствами 1-4.

$$p_{\text{но}} \leq \frac{2^k-1}{2^{n-1}} \sum_{i=1}^{2^k} p(\vartheta_i) = \frac{2^k-1}{2^{n-1}} < \frac{1}{2^{n-k}}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что эта оценка не зависит от свойств используемого кода, поэтому его можно выбрать тривиальным образом, а имен-

но, k первых элементов кодового блока заполнять информационными символами, а $n - k$ оставшихся — нулями.

Таким образом, условия 1—4 являются достаточными для справедливости оценки (1). Необходимость этих условий не утверждается, однако ниже приводится пример невыполнения оценки (1) при нарушении условия 2.

Приведем пример стохастического преобразования, обладающего свойствами 1-4. Пусть с равными вероятностями $1/(2^n - 1)$ генерируется каждая из $2^n - 1$ ненулевых двоичных последовательностей γ_s длины n . Реализации последовательности γ_s , так же как и реализации кодовых блоков ϑ_i , рассматриваются как элементы конечного поля Галуа $GF(2^n)$ и для выполнения преобразования осуществляется умножение этих элементов друг на друга. Операция умножения элементов конечного поля $GF(2^n)$ эквивалентна умножению полиномов $\vartheta_i(x)$ и $\gamma_s(x)$ с коэффициентами из поля $GF(2^n)$, соответствующих последовательностям ϑ_i и γ_s , с последующим приведением полученного произведения по модулю некоторого неприводимого над $GF(2^n)$, полинома степени $n - 1$. Практически такая операция легко осуществляется в регистре с обратными связями, задаваемыми последовательностью γ_s .

Для упрощения генерирования $2^n - 1$ равновероятных ненулевых последовательностей можно равновероятно и взаимно независимо генерировать нули и единицы, а при случайном образовании блока длины n из всех нулей заменять его любым заранее заданным ненулевым блоком, например блоком, которому соответствует единица в конечном поле $GF(2^n)$. Так как вероятность появления нулевой последовательности равна $1/2^n$, то практически можно считать, что оценка (4) будет справедлива и при таком методе реализации стохастического преобразования.

Интересно заметить, что если вместо операции перемножения последовательностей ϑ_i и γ_s осуществлять операцию $\widetilde{\pi}_s$ сложения этих последовательностей по mod2, то из (2) получаем:

$$p_{\text{но}} = \frac{1}{2^n} \sum_{j=1}^{2^k} p(e = \vartheta_j), \quad (5)$$

т.е. такое преобразование никак не влияет на величину $p_{\text{но}}$. Это объясняется тем, что преобразование $\widetilde{\pi}_s$ не удовлетворяет свойству дистрибутивности 2. Действительно,

$$\widetilde{\pi}_s(\vartheta_i \oplus \vartheta_j) = \vartheta_i \oplus \vartheta_j \oplus \gamma_s, \text{ но } \widetilde{\pi}_s \vartheta_i \oplus \widetilde{\pi}_s \vartheta_j = \vartheta_i \oplus \gamma_s \oplus \vartheta_j \oplus \gamma_s = \vartheta_i + \vartheta_j.$$

Пусть случайное преобразование обладает свойствами 1-4, но шум в дискретном канале не является аддитивным и определяется матрицей переходных вероятностей $p(\vartheta' | \vartheta)$, где ϑ и ϑ' — двоичные последовательности длины n . Тогда, видоизменяя (2), получим

$$p_{\text{но}} = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{j=1}^{2^k} p(\vartheta_j) \sum_{s=1}^{2^{n-1}} \sum_{\vartheta_j \neq \vartheta_i} p(\pi_s \vartheta_j | \pi_s \vartheta_i). \quad (6)$$

Покажем, что всегда существует такой двоичный канал, что $p_{\text{но}}$, рассчитанное по (6), не удовлетворяет неравенству (1), если хотя бы одна ненулевая кодовая комбинация имеет вероятность $p(\vartheta_i) \geq 1/(2^k - 1)$.

Для доказательства изменим порядок внутреннего суммирования в (6), тогда

$$p_{\text{но}} = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{j=1}^{2^k} p(\vartheta_j) \sum_{\vartheta_j \neq \vartheta_i} \sum_{s=1}^{2^{n-1}} p(\pi_s \vartheta_j | \pi_s \vartheta_i) \geq \frac{1}{2^{n-1}} \times \frac{1}{2^{k-1}} \sum_{s=1}^{2^{n-1}} p(\pi_s \vartheta_j | \pi_s \vartheta_i), \quad (7)$$

где ϑ_i и ϑ_j — любые кодовые комбинации, причем $p(\vartheta_i) > 1/(2^k - 1)$. Так как $\pi_s \vartheta_i \neq \pi_s \vartheta_j$ по условию 3, накладываемому на преобразование π_s , то вероятности перехода $p(\pi_s \vartheta_j | \pi_s \vartheta_i)$ при фиксированных ϑ_i , ϑ_j и различных s будут всегда находиться в различных строках матрицы переходных вероятностей $p(\vartheta' | \vartheta)$, описывающей данный канал. Поэтому существует такой двоичный канал, для которого эти вероятности сколь угодно близки к единице, а тогда из неравенства (7) следует, что

$$p_{\text{но}} = \frac{1}{2^{k-1}}. \quad (8)$$

Из неравенства (8) видно, что если $k < n - k$, то оценка (1) для такой системы связи и выбранного канала оказывается несправедливой. Заметим, что при доказательстве (8) не использовалась дистрибутивность π_s , поэтому полученный вывод будет справедлив для любого взаимно-однозначного стохастического равновероятного преобразования. Таким образом, построенный на этом этапе метод стохастического кодирования обеспечивает выполнение (1) только для канала с аддитивными ошибками.

Этап 2

Переходим ко второму этапу стохастического преобразования, сводящего произвольный двоичный канал к каналу с аддитивным шумом.

Применим для этого преобразование поразрядного суммирования двоичных последовательностей по mod2 с последовательностями

ми равновероятных и взаимно независимых двоичных символов.

Для такой системы связи вероятность перехода входного блока ϑ_i в выходной блок ϑ_j будет, очевидно, равна

$$p(\vartheta_j|\vartheta_i) = \frac{1}{2^n} \sum_{s=1}^{2^n} p(\vartheta_j \oplus \gamma_s | \vartheta_i \oplus \gamma_s). \quad (9)$$

Введем по определению «образец ошибки» $e = \vartheta_i \oplus \vartheta_j$ и пусть $\vartheta_i \neq \vartheta_j$, а $\vartheta_j = \vartheta_i \oplus e$. Тогда, очевидно, $\vartheta_j \neq \vartheta_i$ и

$$p(\vartheta_j|\vartheta_i) = \frac{1}{2^n} \sum_{s=1}^{2^n} p(\vartheta_i \oplus \gamma_s | \vartheta_i \oplus \gamma_s) \quad (10)$$

$$p(\vartheta_j|\vartheta_i) = \frac{1}{2^n} \sum_{s=1}^{2^n} p(\vartheta_i \oplus e \oplus \gamma_s | \vartheta_i \oplus \gamma_s). \quad (11)$$

Сравнивая слагаемые (10) и (11), можно убедиться, что они являются лишь перестановкой друг друга. Действительно, возьмем любую пару выходных и входных последовательностей из (10), например $\vartheta_i \oplus e \oplus \gamma_{s1}$; $\vartheta_i \oplus \gamma_{s1}$, тогда с ней в точности совпадает одна и только одна пара (11), а но, $(\vartheta_j \oplus e \oplus \gamma_{s2}; \vartheta_i \oplus \gamma_{s2})$, где $\gamma_{s2} = \vartheta_i \oplus \vartheta_j \oplus \gamma_{s1}$. Отсюда непосредственно следует, что (10) и (11) равны между собой, следовательно, канал, после указанного выше преобразования, будет иметь аддитивный шум, так как вероятности переходов $p(\vartheta_j|\vartheta_i)$ зависят только от образцов ошибки $e = \vartheta_i \oplus \vartheta_j$.

Вероятности появления любых образцов ошибок e в таком канале можно рассчитать по формуле:

$$p(e) = \frac{1}{2^n} \sum_{s=1}^{2^n} p(e \oplus \gamma_s | \gamma_s), \quad (12)$$

где γ_s пробегает 2^n различных наборов двоичных последовательностей, а $p(\bullet|\bullet)$ матрица переходов - блоков в исходном канале. В частном случае вероятность образца ошибки $e = 0$, т. е. безошибочного приема любого блока в таком канале будет равна

$$p_{\text{бo}}(n) = \frac{1}{2^n} \sum_{s=1}^{2^n} p(\gamma_s | \gamma_s). \quad (13)$$

Заключение

Из полученных выше результатов становится ясно, как необходимо строить стохастические преобразователи, для того чтобы в любом двоичном канале получить для вероятности не обнаруживаемой ошибки оценку (1): достаточно последовательно осуществить на передающей стороне два стохастических преобразования — сначала преобразование, удовлетворяющее условиям 1- 4 (например, умножение на случайный полином), а затем сложение по mod2 со случайной последовательностью; на приемной стороне необходимо осуществить эти преобразования в обратном порядке. Заметим, что оба эти преобразования должны быть взаимно независимыми, иначе их можно рассматривать как одно преобразование, для которого будет справедливо неравенство (8).

Таким образом, полученные результаты в известной мере закрывают проблему выбора кодов при работе по различным каналам с неизвестной или изменяющейся структурой. Если эти коды используются в системе с решающей обратной связью, то сведение канала к аддитивному, как видно из (13), не уменьшает среднюю скорость передачи.

Литература

1. Коржик В.И. Границы по вероятностям обнаруживаемых ошибок и оптимальные групповые коды в каналах с обратной связью. М.: Радиотехника, 1965. Ч. 1. С. 27-33.
2. Финк Л.М., Коржик В.И. Выбор кодов для обнаружения ошибок в системах с решающей обратной связью // Труды 3-го Междунар. симпозиума по теории информации. Москва-Таллин, 1973. Ч. 1. С. 138-142.
3. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки. М.: «Мир», 1964.
4. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.
5. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В. Использование вынужденной конвергенции для снижения сложности LDPC-декодирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 69-73.

Поступила 30.09.2019; принята к публикации 09.12.2019

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Свиридова Ирина Владимировна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Пухов Дмитрий Анатольевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: voronarez@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>
Демикова Алеся Сергеевна – магистр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kibr@vorstu.ru

APPLICATION OF STOCHASTIC CODING IN SOLUTION FEEDBACK SYSTEMS

A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, D.A. Pukhov, A.S. Demikhova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article describes a practical method of stochastic coding, which provides a sufficiently small probability of undetectable errors for a system of any binary channels. The purpose of the analysis are systems in which the communication channel provides the transmission of signals from the transmitting point to the receiving point with minimal distortion. Practical distortion of signals in real communication channels is inevitable, since the channels are exposed to various kinds of interference, the nature of which can often change. In this paper we consider a system of binary channels, which will carry out a replay of code blocks with detected errors to increase the quality of the signal. One of the most important conditions for data transmission is the transmission of high-definition signal, as errors in the code distorts the information and can lead to disruption of the device. This article discusses a binary channel setup in which all channel errors are additive. For transformations that will help to preserve the integrity of information, consider two stages. At the first stage, the stochastic coding method ensures that the signal is stored only for the channel with additive errors. The second step is a stochastic transformation that reduces an arbitrary binary channel to a channel with additive noise. Both of these transformations have to be mutually independent, otherwise they can be considered as one transformation, if these codes are used in a system with decisive feedback, then the additive channel will not reduce the average rate of information transfer

Key words: stochastic coding, binary channel with noise, system with decisive feedback, information integrity, signal, additive channel

References

1. Korzhik V.I. "Bounds on probabilities of detectable errors and optimal group codes in feedback channels", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 1965, part 1, pp. 27-33.
2. Fink L.M., Korzhik V.I. "Choice of codes for error detection in systems with decisive feedback", *Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Information Theory (Trudy 3-go Mezhdunar. simpoziuma po teorii informatsii)*, Moscow-Tallinn, 1973, part 1, pp. 138-142.
3. Peterson W. "Error-correcting codes", Moscow, Mir, 1964.
4. Khoroshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2018, vol.14, no. 2, pp. 99-105
5. Bashkirov A. V. "Use forced convergence to reduce the complexity LDPC decoding", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 69-73

Submitted 30.09.2019; revised 09.12.2019

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Irina V. Sviridova, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>
Dmitry A. Pukhov, Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: voronarez@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>
Alesya S. Demikhova, MA, Voronezh State Technical University, (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kibr@vorstu.ru

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР-МАНИПУЛЯТОР ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ**Д.В. Журавлев, М.А. Сиваш, А.С. Костюков, Д.И. Наумов, В.А. Мальцев****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: на основе анализа и исследования известного схемотехнического решения генератора прямоугольных импульсов на RS-триггере был разработан двухканальный генератор-манипулятор прямоугольных импульсов с возможностью манипуляции по амплитуде и по частоте. Описан принцип работы двухканального генератора-манипулятора прямоугольных импульсов и его режимы работы при различных значениях напряжения на выходе управляющих генераторов и различных температурных диапазонах, на основании которого проведены моделирование в САПР Multisim и анализ работы двухканального-генератора манипулятора прямоугольных импульсов. Представлены результаты моделирования в виде графиков, на которых отображена зависимость напряжения на выходе двухканального генератора-манипулятора прямоугольных импульсов при изменении уровня напряжения управляющих генераторов. Данный генератор может быть использован в импульсных радиопередающих устройствах, в измерительной технике в качестве источника прямоугольных импульсов, манипулированных по частоте и по амплитуде. Генератор за счёт изменения его конструкции генерирует и одновременно манипулирует по амплитуде и по частоте генерируемую последовательность прямоугольных импульсов. Это расширяет функциональные возможности известного генератора манипулированных по амплитуде прямоугольных импульсов

Ключевые слова: двухканальный генератор, амплитудная манипуляция, частотная манипуляция, асинхронный RS-триггер, МОП-транзисторы, логические элементы

Введение

Генераторы прямоугольных импульсов с возможностью манипуляции по амплитуде и по частоте имеют широкое распространение в различных отраслях техники. Они применяются в радиоприемных устройствах, импульсных радиопередающих устройствах, измерительной технике и т.д. Генератор должен обладать высокими КПД и стабильностью частоты генерации в зависимости от температуры, а также широкой полосой рабочих частот.

Постановка задачи

Известна структура генератора прямоугольных импульсов (рис. 1), описанная в патенте на полезную модель номер 150841 РФ (опубликован 27.02.15. Бюл. № 6, авторы Шеховцов Д.В., Мушта А.И., Сальников Д.Н.)

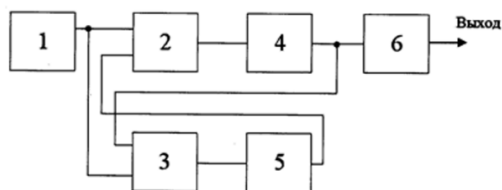


Рис. 1. Структурная схема двухканального генератора прямоугольных импульсов

Данный генератор является ближайшим аналогом. Содержит внешний генератор управляющих прямоугольных сигналов, первый логический элемент 2ИЛИ-НЕ, второй логический элемент 2ИЛИ-НЕ, первую цепь задержки прохождения сигналов, вторую цепь задержки прохождения сигналов, буферный логический элемент, состоящий из двух последовательно включенных инверторов, выход буферного логического элемента является выходом генератора прямоугольных импульсов, для функционирования генератора прямоугольных импульсов необходим только один внешний генератор управляющих прямоугольных сигналов.

Недостатком известного генератора прямоугольных импульсов является то, что в нём отсутствует функция и возможность осуществления манипуляции по частоте последовательности прямоугольных импульсов.

Техническим результатом является расширение функциональных возможностей известного генератора прямоугольных импульсов.

Техническая реализация

Генератор содержит первый генератор управляющих прямоугольных сигналов, управляющий амплитудой генерируемой импульсной последовательности, первый логический элемент 2ИЛИ-НЕ, второй логический элемент 2ИЛИ-НЕ, первую цепь задержки прохождения

сигналов и вторую цепь задержки прохождения сигналов, подключенные к выходам первого и второго логических элементов 2ИЛИ-НЕ соответственно, выходы первой и второй цепей задержки сигналов подключены к второму входу первого и к второму входу второго логических элементов соответственно, подключенный к выходу первой цепи задержки прохождения сигналов буферный логический элемент состоит из двух последовательно включенных первого инвертора и второго инвертора соответственно, выход буферного логического элемента является выходом генератора прямоугольных импульсов, потенциальный выход генератора управляющих прямоугольных сигналов подключен к первым входам первого и второго логических элементов 2ИЛИ-НЕ соответственно, отличающийся тем, что введены второй генератор управляющих прямоугольных импульсов, блок регулирования частоты следования прямоугольных импульсов, в котором исток и сток первого nМОП транзистора с индуцированным каналом подключены параллельно резистору R10 первой цепи задержки прохождения сигнала, исток и сток второго nМОП транзистора с индуцированным каналом подключены параллельно резистору R13 второй цепи задержки прохождения сигнала, вариация величин параметров элементов первой и второй цепей задержки прохождения сигнала позволяет изменять частоту генерации прямоугольных импульсов в процессе частотной манипуляции прямоугольных импульсов.

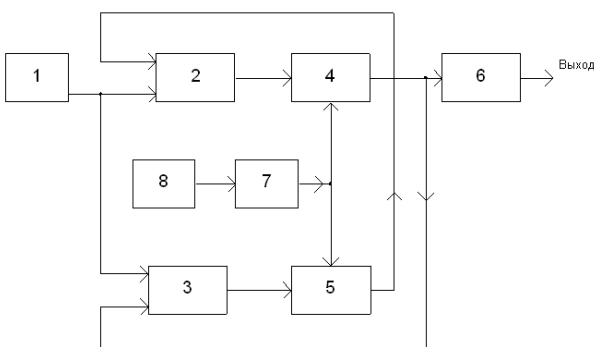


Рис. 2. Структурная схема двухканального генератора манипулятора прямоугольных импульсов

Первая цепь задержки прохождения сигнала может быть реализована, в частности, в виде RC-фильтра с использованием конденсаторов C9, C11 и резистора R10. При этом первый вывод резистора R10 соединен с первым выводом конденсатора C9, выходом первого логического элемента (2) 2ИЛИ-НЕ и истоком

nМОП транзистора (15) с индуцированным каналом блока (7) регулирования частоты следования прямоугольных импульсов, второй вывод резистора R10 соединен с первым выводом конденсатора C11, входом первого инвертора (17) НЕ и стоком nМОП транзистора (15) с индуцированным каналом, вторые выводы конденсаторов C9, C11 соединены с общей шиной источника питания устройства.

Вторая цепь задержки прохождения сигнала может быть реализована, в частности, в виде RC-фильтра с использованием конденсаторов C12, C14 и резистора R13. При этом первый вывод резистора R13 соединен с первым выводом конденсатора C12, выходом второго логического элемента (3) 2ИЛИ-НЕ и истоком nМОП транзистора (16) с индуцированным каналом, второй вывод резистора R13 соединен с первым выводом конденсатора C14, со стоком nМОП транзистора (16) с индуцированным каналом и вторым входом первого логического элемента (2) 2ИЛИ-НЕ, вторые выводы конденсаторов C12, C14 соединены с общей шиной источника питания устройства.

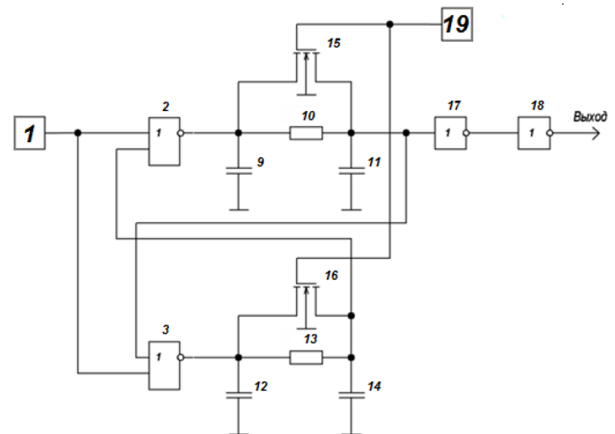


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема двухканального генератора-манипулятора прямоугольных импульсов

Рассмотрим процесс амплитудной манипуляции прямоугольных импульсов.

Генератор прямоугольных импульсов работает следующим образом. Из логической схемы асинхронного RS-триггера на логических элементах 2ИЛИ-НЕ следует, что запрещенная комбинация входных сигналов ($S^k=1$, $R^k=1$) приводит к появлению на его выходах значений $Q^k=\bar{O}^k=0$ (здесь обозначено: $\bar{O}$ есть НЕ Q). Действительно, $Q=NE(R+\bar{O})=0$, $\bar{O}=NE(S+Q)=0$. Если теперь на вход асинхронного RS-триггера подать комбинацию $S^k=0$, $R^k=0$, соответствующую режиму хранения, то схема

триггера вырождается в бистабильную ячейку, в какое состояние опрокинется ячейка – неизвестно [1]. После первого опрокидывания на выходах Q и $\bar{Q}$ асинхронного RS-триггера устанавливаются одинаковые логические уровни. Далее за счет положительной обратной связи, как в обычном генераторе незатухающих колебаний, в асинхронном RS-триггере возникает колебательный процесс, длительность которого определяется временем, в течение которого $S^k=0$, $R^k=0$. В схеме генератора (рис. 1) процесс возникновения колебательного процесса аналогичен описанному выше применительно к асинхронному RS-триггеру. Но в двухканальном генераторе-манипуляторе прямоугольных импульсов, манипулированных по амплитуде и по частоте (рис. 3), первые входы первого и второго логических элементов соединены, поэтому прямоугольные импульсы на выходе генератора прямоугольных импульсов генерируются при перепаде $1 \rightarrow 0$ логического напряжения на выходе генератора (1) управляющих прямоугольных сигналов, генерация прямоугольных импульсов продолжается в течение времени наличия на выходе генератора (1) управляющих прямоугольных сигналов напряжения логического нуля, генерация прямоугольных импульсов прекращается при перепаде $0 \rightarrow 1$ логического напряжения на выходе генератора (1) управляющих прямоугольных сигналов.

Рассмотрим процесс частотной манипуляции прямоугольных импульсов.

Период (T) времени одного полного цикла прохождения прямоугольного импульса в заявленном генераторе включает в себя время

$$T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4, \quad (1)$$

где Δt_1 – время прохождения через первый логический элемент (2) 2ИЛИ-НЕ сигнала, поступившего от первого внешнего генератора управляющих прямоугольных сигналов (1) на первый вход первого логического элемента (2) 2ИЛИ-НЕ; Δt_2 – время прохождения сигнала через первую цепь задержки сигнала (4); Δt_3 – время прохождения через второй логический элемент (3) 2ИЛИ-НЕ сигнала, поступившего с выхода первой цепи задержки сигнала (4) на второй вход второго логического элемента (3) 2ИЛИ-НЕ; Δt_4 – время прохождения сигнала через вторую цепь задержки сигнала (5) до второго входа первого логического элемента (2) 2ИЛИ-НЕ.

Исток и сток первого nМОП транзистора (15) с индуцированным каналом подключен параллельно резистору R10 первой цепи за-

держки прохождения сигнала. Исток и сток второго nМОП транзистора (16) с индуцированным каналом подключен параллельно резистору R13 второй цепи задержки прохождения сигнала.

Сопротивление R_{VT} МОП транзистора с индуцированным каналом в зависимости от управляющего напряжения U_{BX} может принимать два значения: $R_{VT}=R_{насыщения} \rightarrow 0$, если МОП транзистор включен (находится в режиме насыщения), и $R_{VT}=R_{заперт} \rightarrow \infty$, если МОП транзистор выключен (заперт) [2]. Вторым генератором управляющих прямоугольных сигналов (8) при перепадах $0 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$ логического напряжения на его выходе изменяет значение сопротивления канала сток-исток R_{VT} МОП транзисторов с индуцированными каналами в зависимости от управляющего напряжения U_{BX} . Сопротивление R_{VT} включено параллельно резистору R10 первой цепи задержки прохождения сигнала, такое же сопротивление R_{VT} включено параллельно резистору R13 второй цепи задержки прохождения сигнала. Поэтому изменяется величина эквивалентных сопротивлений $R_{1экв}$ между узлами: первый вывод конденсатора C9, первый вывод конденсатора C11 первой цепи задержки прохождения сигнала и $R_{2экв}$ между узлами: первый вывод конденсатора C12, первый вывод конденсатора C14 второй цепи задержки прохождения сигнала. Это приводит к изменению интервалов времени Δt_2 , Δt_3 , поэтому изменяется период одного полного цикла прохождения прямоугольного сигнала в генераторе, вариация величин параметров элементов первой и второй цепей задержки прохождения сигнала позволяет изменять частоту генерации прямоугольных импульсов, в итоге реализуется частотная манипуляция.

Частотную манипуляцию характеризуют две генерируемые последовательности прямоугольных импульсов с частотами f_1 и f_2 . Последовательность прямоугольных импульсов с частотой f_1 генерируется при перепаде $0 \rightarrow 1$ логического напряжения на выходе второго генератора управляющих прямоугольных сигналов, генерация прямоугольных импульсов с частотой f_1 продолжается в течение времени наличия на выходе второго генератора управляющих прямоугольных сигналов напряжения логической единицы. Последовательность прямоугольных импульсов с частотой f_2 генерируется при перепаде $1 \rightarrow 0$ логического напряжения на выходе второго генератора управляющих прямоугольных сигналов, генерация прямоугольных импульсов с частотой f_2 продолжает-

ся в течение времени наличия на выходе второго генератора управляющих прямоугольных сигналов напряжения логического нуля, генерация прямоугольных импульсов с частотой f_2 прекращается при перепаде $0 \rightarrow 1$ логического напряжения на выходе второго генератора управляющих прямоугольных сигналов, изменения частот генерации прямоугольных импульсов с f_1 на f_2 и с f_2 на f_1 осуществляется без разрыва фазы колебаний, частоты генерации прямоугольных импульсов f_1 и f_2 связаны неравенством

$$f_1 > f_2. \quad (2)$$

Проведено моделирование полезной модели: двухканальный генератор - манипулятор прямоугольных импульсов.

Функциональная схема генератора на логических элементах 2ИЛИ-НЕ 74 серии с использованием nМОП транзисторов с индуцированными каналами в конструкции генератора представлена на рис. 2. При этом использованы следующие элементы: первый генератор (1) управляющих сигналов, первый логический элемент 2ИЛИ-НЕ (2), второй логический элемент 2ИЛИ-НЕ (3), первая цепь задержки прохождения сигналов (5), реализованная в виде П-образного RC-фильтра и содержащая конденсаторы C9, C11 и резистор R10; вторая цепь задержки прохождения сигналов (4), реализованная в виде П-образного RC-фильтра и содержащая конденсаторы C12, C14 и резистор

R13; буферный логический элемент (6), реализованный первым (17) и вторым (18) инверторами соответственно; блок (7) регулирования частоты следования прямоугольных импульсов, реализованный в виде первого (15) и второго (16) nМОП транзисторов, второй генератор управляющих импульсов (8).

Электрическая схема генератора прямоугольных импульсов, манипулируемых по амплитуде и по частоте, на логических элементах 2ИЛИ-НЕ с использованием nМОП транзисторов в конструкции генератора представлена на рис. 3, на которой указаны типы использованных первого (1) и второго (19) генераторов управляющих импульсов, первого (2) и второго (3) логических элементов 2ИЛИ-НЕ, первого (17) и второго (18) инверторов буферного логического элемента (6), параметры индуцированных каналов первого (15) и второго (16) nМОП транзисторов, номиналы параметров элементов цепей задержки прохождения сигналов.

В качестве примера заданы частоты первого (1) и второго (19) управляющих генераторов: 40 кГц и 400 кГц соответственно. Временная диаграмма работы генератора в режиме амплитудной манипуляции приведена на рис. 4. Временные диаграммы работы генератора в режиме и по амплитуде, и по частоте при вариации температуры в интервале: а) -40°C , б) $+27^\circ\text{C}$, в) $+125^\circ\text{C}$ приведены на рис. 5.

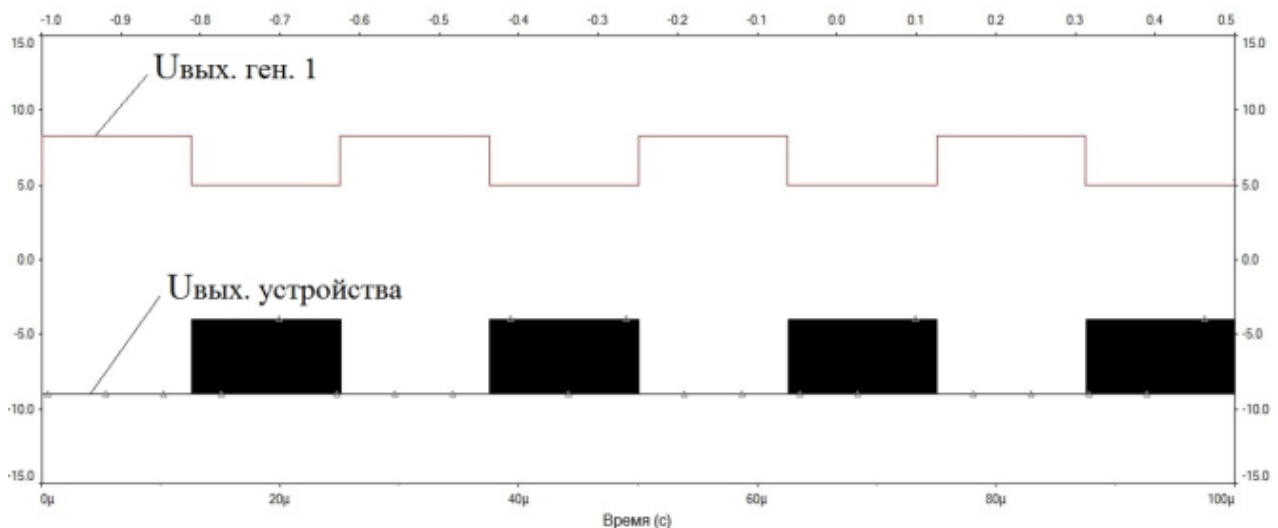


Рис. 4. Временная диаграмма работы генератора в режиме амплитудной манипуляции

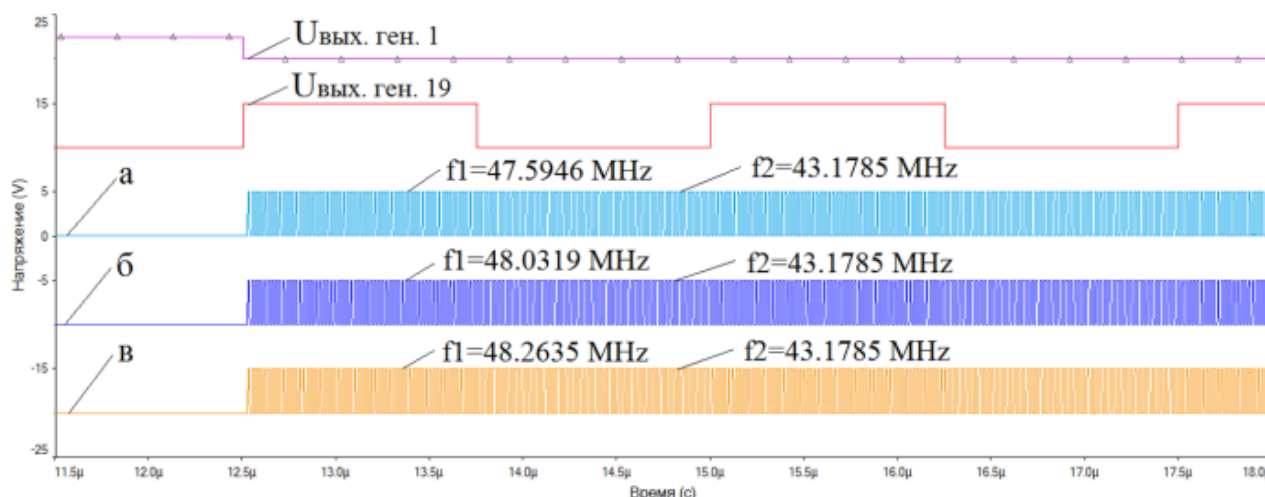


Рис. 5. Временные диаграммы работы генератора в режиме и по амплитуде, и по частоте при вариации температуры

Результаты анализа стабильности манипулированных по частоте генерируемых колебаний с частотами f_1 и f_2 при изменении температуры окружающей среды в интервале от -40°C до $+125^\circ\text{C}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	$f_1, \text{МГц}$	q_1	$f_2, \text{МГц}$	q_2
-40	47.5946	$9.1 \cdot 10^{-3}$	43.1785	0
+27	48.0319	0	43.1785	0
+125	48.2635	$4.8 \cdot 10^{-3}$	43.1785	0

Относительная нестабильность частоты генерации f_2 практически отсутствует. Это объясняется тем, что сопротивление R_{vT} МОП транзистора с индуцированным каналом $R_{vT} = R_{заперт} \rightarrow \infty$, если МОП транзистор выключен (заперт) [2].

Относительная нестабильность частоты генерации f_1 в зависимости от температуры лежит в пределах от $9.1 \cdot 10^{-3}$ до $4.8 \cdot 10^{-3}$. Это объясняется влиянием нестабильности параметров $C_{зат1}$ - емкость затвора и эквивалентного сопротивления $Z_{1экв}$ выходной цепи nМОП транзистора Q15, содержащей R_{i1} - внутреннее сопротивление, $C_{си1}$ - емкость сток-исток, а также параметров $C_{зат2}$ - емкость затвора и эквивалентного сопротивления $Z_{2экв}$ выходной цепи nМОП транзистора Q16, содержащей R_{i2} - внутреннее сопротивление, $C_{си2}$ - емкость сток-исток. Для снижения нестабильности генерируемой частоты f_1 выбирать транзисторы Q15, Q16 с малыми значениями емкости затвора $C_{зат1}$ и емкости затвора $C_{зат2}$, а также емкости сток-исток $C_{си1}$ и $C_{си2}$ транзисторов Q15, Q16 соответственно.

Результаты анализа стабильности генерируемых колебаний, манипулированных по ча-

стоте, при изменении напряжения источника питания устройства приведены в табл. 2.

Таблица 2

$E, \text{В}$	$f_1, \text{МГц}$	q_1	$f_2, \text{МГц}$	q_2
4.25	48.0319	0	43.1785	0
5.00	48.0319	0	43.1785	0
5.75	48.0319	0	43.1785	0

Из табл. 2 следует, что пятнадцатипроцентное изменение напряжения питания устройства не влечёт за собой изменений стабильности генерируемых колебаний, манипулированных по частоте.

Заключение

Таким образом, заявленный генератор за счёт изменения его конструкции генерирует и одновременно манипулирует по амплитуде и по частоте генерируемую последовательность прямоугольных импульсов. Это расширяет функциональные возможности известного генератора манипулированных по амплитуде прямоугольных импульсов. По результатам моделирования относительная нестабильность частоты генерации f_1 в зависимости от температуры лежит в пределах от $9.1 \cdot 10^{-3}$ до $4.8 \cdot 10^{-3}$.

Генератор может быть использован и для реализации манипуляции последовательности прямоугольных импульсов только по одному параметру: либо по амплитуде, либо по частоте.

Литература

1. Новожилов О.П. Основы цифровой техники: учеб. пособие. М.: Издательское предприятие «РадиоСофт», 2004. С. 202.

2. Опадчий Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И.

Гуров; под ред. О.П. Глудкина. М.: Радио и связь, 1996. С. 410.

Поступила 21.11.2019; принята к публикации 11.12.2019

Информация об авторах

Журавлёв Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: ddom@bk.ru

Сиваш Михаил Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: sivmikka@yandex.ru

Костюков Александр Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: stalkerklon@mail.ru

Наумов Даниил Игоревич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: dan4ik19naumov@gmail.com

Мальцев Владислав Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: m.vlad2148@yandex.ru

DOUBLE-CHANNEL GENERATOR-MANIPULATOR OF RECTANGULAR PULSE

D.V. Zhuravlev, M.A. Sivash, A.S. Kostyukov, D.I. Naumov, V.A. Mal'tsev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: based on the analysis and research of the well-known circuitry of a rectangular pulse generator on the RS-trigger, a double-channel rectangular pulse manipulator-generator was developed with the ability to manipulate in amplitude and frequency. The principle of operation of a two-channel generator of the manipulator of rectangular pulses and its modes of operation at different voltage values at the output of the control generators and various temperature ranges are described, on the basis of which simulation in CAD Multisim and analysis of the work of a two-channel generator of the manipulator of rectangular pulses are carried out. The simulation results are presented in the form of graphs showing the dependence of the voltage at the output of a two-channel generator-manipulator of rectangular pulses when the voltage level of the control generators changes. This generator can be used in pulsed radio transmitting devices, in measuring equipment as a source of rectangular pulses, manipulated in frequency and amplitude. The generator, by changing its design, generates and simultaneously manipulates in amplitude and frequency the generated sequence of rectangular pulses. This extends the functionality of the well-known generator of amplitude-manipulated rectangular pulses

Key words: double-channel generator, amplitude-shift keying, frequency-shift keying, asynchronous RS-trigger, MOS transistors, logic elements

References

1. Novozhilov O.P. "Basics of digital technology. Manual" ("Osnovy tsifrovoy tekhniki: ucheb. posobie"), Moscow, Radio-Soft, 2004, 528 p.
2. Opadchiy Yu.F., Gludkin O.P., Gurov A.I., ed. Gludkina O.P. "Analog and digital electronics: textbook" ("Analogovaya i tsifrovaya elektronika: uchebnik dlya vuzov"), Moscow, Radio i svyaz', 1996, 768 p.

Submitted 21.11.2019; revised 11.12.2019

Information about the authors

Dmitriy V. Zhuravlev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: ddom@bk.ru

Mikhail A. Sivash, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: sivmikka@yandex.ru

Aleksandr S. Kostyukov, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: stalkerklon@mail.ru

Daniil I. Naumov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: dan4ik19naumov@gmail.com

Vladislav A. Mal'tsev, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: m.vlad2148@yandex.ru

ПРИНЦИПЫ ЗАЩИТЫ ПЕЧАТНЫХ МОДУЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА ЭТАПАХ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕСТИРОВАНИЯ

М.А. Ромащенко¹, Д.С. Сеимова¹, С.Н. Рожненко²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО ВЦКБ «Полус», г. Воронеж, Россия

Аннотация: защита от статического электричества в настоящее время является одной из важнейших задач любой деятельности в области конструирования и производства электронных средств. Осознание рисков, связанных с влиянием импульсных перенапряжений, в том числе и от электростатического разряда, и применение методик защиты от их воздействия становятся все более актуальными для многих предприятий, работающих в области электронной промышленности. Растущие тенденции к миниатюризации приводят к тому, что корпуса некоторых элементов печатного модуля достигают таких небольших размеров, что даже минимальное воздействие электростатического импульса может привести к необратимым повреждениям устройства в целом. Одного электростатического разряда может быть недостаточно для вывода печатного модуля из строя, однако повторяющиеся со временем разряды приведут к ухудшению функционирования, а в дальнейшем и к его полному отказу. Электростатический разряд является одним из основных факторов, способствующих снижению надежности и производительности электронных устройств. В данной статье представлена методика внедрения механизмов защиты печатных модулей электронных средств от электростатического разряда в технологиях CMOS

Ключевые слова: электростатический разряд (ЭСР), печатная плата (ПП), электронное средство (ЭС), печатный модуль

Введение

Электростатический разряд (ЭСР) вызывает лавинообразный поток электричества между двумя объектами при их контакте друг с другом, что приводит к электрическим или термическим повреждениям, а в дальнейшем и к сбою в работе печатного модуля. Каждая часть печатного модуля рассчитана для работы в определенных условиях. В случае, когда порог нормального функционирования превышает, то компонент, плата или соединительная цепь повреждаются. Одного электростатического разряда может быть не достаточно для полного разрушения устройства, однако повторяющиеся со временем разряды приведут к ухудшению функционирования, а в дальнейшем и к его полному отказу [1]. Таким образом, защита от статического электричества является одной из задач, которые разработчики и производители электроники должны учитывать в своей деятельности.

ЭСР воздействует на электронные компоненты различными способами. Высоковольтные статические напряжения могут попасть в устройство и повредить его сложные внутренние структуры. Влияние электростатического

разряда стало более значимым, поскольку высокие входные импедансы технологии МОП (металл-оксид-полупроводник) во всех ее видах означают, что напряжения не рассеиваются, а небольшие размеры проводников и изолирующих прокладок могут быть легко повреждены высокими напряжениями. С уменьшением размеров компонентов печатного модуля увеличивается их восприимчивость к повреждениям от ЭСР. Таким образом, полупроводниковое устройство может выйти из строя, если оно находится на пути прохождения разряда от ЭСР. В радиоэлектронной промышленности ЭСР рассматривается подобно типу отказа, который известен как электрическое перенапряжение, включающее в себя условия вне проектной рабочей среды, такие как напряжение, ток и температура [2]. Кроме того, ЭСР может также влиять на интегральные схемы (ИС) на разных этапах их жизненного цикла: от процесса изготовления пластин (первый этап процесса изготовления микросхемы) с последующим отказом в нормальном функционировании (жесткий сбой) или вызвать частичное повреждение (мягкий сбой). Следовательно, важно понимать явление ЭСР и разрабатывать схемы защиты, которые способны предотвращать такие сбои. Основной целью методов защиты от ЭСР является минимизация

генерирования разрядов на проводящей части устройства.

Процесс ЭСР в печатном модуле состоит из четырех этапов: накопление заряда, передача заряда, реакция и отказ устройства. Первый этап, накопление заряда, приводит к дисбалансу электронов между двумя телами, которые образуют электрическое поле. Когда два объекта с двумя различными потенциальными зарядами вступают в контакт, происходит вторая стадия ЭСР, при которой заряд переходит от объекта с более высоким потенциалом к объекту с более низким потенциалом, пока напряжения между ними не станут равными [3].

Последствия электростатического разряда зависят от большого числа переменных. Большинство из них трудно определить количественно. Уровень статики, который создается, варьируется в зависимости от используемых материалов и условий окружающей среды. Способ разряда также различается. Часто заряд рассеивается достаточно быстро: обычно менее чем за сто наносекунд. За это время пиковый ток может подняться до 20 - 30 мкА [4]. Пиковый ток и время разряда обуславливаются широким спектром факторов. Однако, если используется металлический предмет, например пинцет или тонкие плоскогубцы, пик тока выше и достигается за более короткое время, чем если бы разряд происходил через конечность человека. Это достигается за счет того, что металл обеспечивает гораздо низкий путь сопротивления для разрядки.

Материалы ПП могут заряжаться различными способами: трибоэлектрическим зарядом, контактом с другим заряженным материалом и индукцией. Трибоэлектрический заряд является наиболее распространенным способом, и это происходит, когда два материала вступают в контакт, а затем разделяются. При таком воздействии электроны переходят от одного объекта к другому в зависимости от электрических их характеристик. При разделении двух материалов, являющихся проводниками, электроны между ними перераспределяются и уравниваются, а в случае материалов-изоляторов они заряжаются. Существует несколько факторов, которые влияют на величину трибоэлектрического заряда, такие как площадь контакта, скорость разделения, относительная влажность, химический состав материалов и другие.

Контакт с другим заряженным материалом - это случай, когда заряженный объект

вступает в контакт с изолированным объектом с более низким потенциалом. Пока эти два объекта находятся в контакте, заряд переходит к объекту с более низким потенциалом, пока напряжение не будет сбалансировано между ними. После разделения оба объекта будут иметь заряд с одинаковой полярностью, но величина заряда будет пропорциональна емкости каждого объекта. Индуктивный заряд, напротив, не требует физического контакта между двумя объектами. Данное событие происходит, когда заряженный объект находится достаточно близко к проводящему объекту. Электрическое поле, создаваемое заряженным объектом, приводит к внутреннему разделению зарядов в проводящем объекте.

Возникновение ЭСР при производстве печатных плат

Автоматизированные производственные линии имеют несколько этапов обработки, на которых могут образовываться электростатические заряды. Измерения на производственных линиях демонстрируют накопление ЭСР на следующих этапах обработки: нанесение паяльной пасты, сборка (автоматическая и ручная, установка), маркировка, а также оптические и электрические испытания.

На этапе установки печатных модулей в корпус также необходимо учитывать возможность возникновения ЭСР. Это может произойти вследствие того, что подавляющее большинство современных корпусов изготавливается из пластмасс и пластиков, способных накапливать статические заряды.

Таким образом, производитель должен предусмотреть комплекс мероприятий по защите от ЭСР на протяжении всего производственного процесса, во время тестирования изделий, а также его будущей эксплуатации. Комплекс мероприятий в обязательном порядке должен распространяться на SMD резисторы и конденсаторы, NEMS (наноэлектромеханические системы) и MEMS (микроэлектромеханические системы).

Известно, что в процессах нанесения покрытия электростатические заряды могут накапливаться на подложке из-за различных предшествующих операций. Это приводит к накоплению электрического поля в пленке с последующим покрытием, что, в свою очередь, вызывает образование дефектов из-за электростатически управляемых потоков. Тонкопленочное плавление происходит ввиду того, что

высокая плотность тока создает Джоулев нагрев, который может расплавить область структуры печатного модуля. Кроме того, при высокой плотности тока может произойти образование проводящего канала в диэлектрике с определенной величиной сопротивления, крайним случаем которого является короткое замыкание. Таким образом, для получения высококачественных покрытий желательно сохранять устойчивость материалов к электростатической дестабилизации [5].

Нанесение покрытий и печать являются межфазными процессами, которые распространены в промышленности. Прецизионные покрытия придают функциональность и повышают производительность изделий. С другой стороны, рулонная печать с высоким разрешением все больше используется для создания плотной и гибкой печатной электроники на высоких скоростях. Электростатические эффекты в значительной степени влияют на оба этих процесса.

В перспективе целесообразно иметь программно-аппаратный комплекс, который анализирует выравнивающие свойства жидких покрытий в присутствии электростатических зарядов, чтобы обеспечить выполнение руководящих принципов при проектировании современных печатных модулей. Большинство связанных с этим исследований сосредоточено на том, как электрические поля могут быть использованы для создания поверхностных структур в тонких пленках жидкости.

Способы подавления ЭСР

Значительно снизить вероятность возникновения проблем с ЭСР позволяет качественно спроектированный печатный модуль. Для создания такого модуля необходимо понимание показателей качества, которые используются для сравнения различных методов защиты от электростатического разряда. Необходимо создать определенные места электростатического разряда при помощи металлизированных участков печатной платы, чтобы обеспечить низкоомный путь разряда, который приводит к защите всего печатного модуля. Такой механизм защиты от ЭСР должен иметь следующие характеристики:

- низкое сопротивление;
- низкий ток утечки;
- его входное напряжение должно быть больше, чем напряжение питания (VDD);

- действует сразу же, когда происходит явление ЭСР;

- способен выдерживать большие токи;
- занимает наименьшую область макета;
- невосприимчив к ложному срабатыванию, а также к шуму источника питания.

Для достижения адекватных характеристик из приведенного выше списка были разработаны различные виды механизмов защиты от ЭСР, которые подразделяются на следующие категории:

- статический источник питания ЭСР;
- кратковременный источник питания ЭСР.

Выбор типа защиты для использования в конструкциях печатного модуля зависит от многих критериев. Первым критерием является то, какие элементы схемы используются при разработке. Второй связан со средой, в которой будет использоваться устройство. Последний критерий - это пропускная способность и время срабатывания защитного элемента.

Статический механизм защиты включает, когда напряжение на шинах источника питания превышает напряжение срабатывания, после чего происходит электростатическая разрядка. Статические механизмы защиты можно разделить на три категории: на основе диодов, на основе MOSFET (полевой транзистор на основе оксида металла и полупроводника) и на основе SCR (кремниевый выпрямитель).

Антистатические элементы на диодной основе. Поскольку диод может выдерживать очень высокий ток, когда он работает в прямом смещенном состоянии, предлагается диодная цепочка, как показано на рис. 1, а [6].

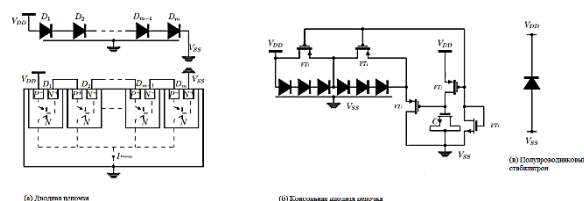


Рис. 1. Антистатические элементы на диодной основе:
а - диодная цепочка; б - консольная диодная цепочка;
в - полупроводниковый стабилизатор

Напряжение срабатывания конструкции можно отрегулировать, увеличив число диодов, используя следующее уравнение:

$$V_{\text{напр.сраб.}}(I) = m \times V_D(I) - n \times V_T \times \frac{m(m-1)}{2} \times \ln(\beta + 1),$$

где m - количество диодов, V_D - напряжение срабатывания, n - коэффициент идеально-

сти, а β - коэффициент усиления по току PNP-транзисторов, которые используются для шунтирования тока ЭСР. Основными недостатками этой конструкции являются:

- ток утечки, который увеличивается при увеличении количества диодов;
- установка большого количества диодов не приводит к линейному увеличению напряжения срабатывания;
- напряжение срабатывания уменьшается, а ток утечки увеличивается с увеличением температуры.

Чтобы преодолеть проблему утечки, предложена консольная диодная цепочка, показанная на рис. 1,б. Транзистор VT1 используется для блокировки диодной цепи от VSS, когда схема работает в нормальных рабочих условиях - как следствие, ток утечки уменьшается. Когда происходит явление ЭСР, VT1 включается и реализует проводящий путь между шинами электропитания. Транзисторы VT2 и VT5 с конденсатором С используются для обнаружения ЭСР и включения транзистора VT1, в то время как VT3 и VT4 используются для распределения тока между цепочкой диодов, таким образом, происходит снижение напряжения. Консольная диодная цепочка была разработана для уменьшения тока утечки в диодных схемах защиты от ЭСР, работающих в высокотемпературной среде. Однако площадь конструкции полупроводникового стабилитрона является большой по сравнению с диодной цепочкой, поскольку транзистор M1 должен быть большим, чтобы поглощать значительную часть тока во время явления ЭСР.

Кроме того, статические механизмы защиты от электростатического разряда могут быть разработаны с использованием различных видов диодов, таких как стабилитроны, как показано на рис. 1,в. Когда происходит явление ЭСР, стабилитрон работает в области лавинного пробоя. Следовательно, напряжение пробоя стабилитрона должно быть больше напряжения питания; кроме того, использование стабилитрона может быть недоступно во многих конструкциях печатного модуля, поскольку требует дополнительных этапов обработки.

Статические механизмы защиты на основе MOSFET

N-канальный МОП-прибор (NMOS) с заземленным затвором (GGNMOS) был одним из первых предложенных механизмов защиты на

основе МОП, как показано на рис. 2, а, в котором ширина транзистора обычно составляет 800 мкм [7]. Преимущество этой конструкции в том, что она не требует большой площади кремния. В результате такой механизм имеет медленный отклик на явление ЭСР, и некоторые транзисторы в ядре схемы могут иметь меньший интервал, чтобы они могли включиться до GGNMOS.

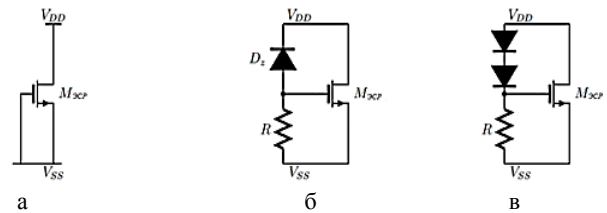


Рис. 2. Статический механизм защиты от электростатического разряда на основе MOSFET: а - GGNMOS; б - полупроводниковый стабилитрон; в - диодная цепочка

Для увеличения скорости отклика GGNMOS предложена конструкция стабилитрона с диодом, как показано на рис. 2,б. Следовательно, время запуска уменьшается по сравнению с GGNMOS, но эта конструкция имеет те же недостатки, что и полупроводниковый стабилитрон. Другой вариант был предложен в [7] для преодоления медленного отклика, как показано на рис. 2,в. Конструкция состоит из поликремниевой диодной цепочки с утечкой порядка мкА, которая на три порядка ниже по сравнению с кремниевыми диодами при напряжении питания 5 В. Чтобы уменьшить ток утечки, количество диодов должно составлять от 6 до 9.

Статические механизмы защиты на основе SCR

Устройства с кремниевым выпрямителем (SCR) могут выдерживать высокие напряжения от ЭСР с небольшой площадью компоновки по сравнению с другими традиционными элементами защиты от электростатического разряда. Тем не менее, обычно они имеют низкий пусковой и удерживающий ток и напряжение, что вызывает их срабатывание из-за внешнего шума при работе схемы в нормальных рабочих условиях. Конструкция состоит из SCR, NMOS-транзистора с заземленным затвором (GGNMOS) и внешнего сопротивления.

Для запуска SCR требуется более высокий базовый ток, что приводит к более высоким токам удержания и запуска. Удерживающий ток такой конструкции в три раза больше, чем у обычного низковольтного кремниевого выпрямителя.

Для увеличения напряжения срабатывания низковольтного кремниевого выпрямителя используется диодная цепочка. В этой архитектуре, когда число диодов увеличивается, напряжение срабатывания также увеличивается. Обычно используются 2-3 диода, однако при этом удерживающее напряжение должно быть выше напряжения питания, чтобы обеспечить защиту от защелкивания [8].

Переходные механизмы защиты

Переходные механизмы защиты от ЭСР имеют следующие преимущества: они включаются очень быстро и очень медленно выключаются, остаются включенными для электростатической разрядки в течение фиксированного периода времени, который определяется сетью RC и цепью задержки. Также обеспечивают защиту от электростатического разряда на низком напряжении запуска и не требуют каких-либо дополнительных операций. Тем не менее, переходной механизм защиты может сработать, когда главная цепь находится в нормальном рабочем режиме, что приведет к замыканию источника питания на землю. Переходные механизмы могут быть классифицированы как на основе MOSFET, так и на основе SCR [9].

Заключение

Таким образом, механизм защиты от ЭСР должен обеспечивать низкоомный путь в обоих направлениях, чтобы иметь возможность работать с режимами переключения. Конструкция на основе SCR не обеспечивает наилучшую защиту от ЭСР для режима переключения положительного напряжения электростатического разряда с заземленным узлом

напряжения питания, поскольку она имеет два паразитных сопротивления и один паразитный диод (коллектор к базовому соединению) диод из PNP-транзистора на пути от шин питания до «земли». Кроме того, механизмы защиты на основе SCR не подходят для конструкций, которые подвергаются множественным переключениям или ионизирующему излучению.

Литература

1. Сеимова Д.С., Ромащенко М.А. Повышение эффективности методик тестирования электронных средств на устойчивость к электростатическому разряду // Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. 2019. С. 236 – 238.
2. Glotov V.V., Ostroumov I.V., Romashchenko M.A. Development of models simulating operation of elements of radio devices, for solving problems of ensuring electromagnetic compatibility of radio electronic means // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Т. 1015. С. 032172.
3. Ромащенко М.А., Сеимова Д.С. Основные принципы проведения исследований влияния электростатических разрядов на элементную базу // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 133-137.
4. Жаднов В.В. Влияние электростатических разрядов на показатели ремонтопригодности электронных средств // Технологии электромагнитной совместимости. 2015. № 4. С. 29-34.
5. Procedure of complex analysis of mechanical properties of printed circuit boards in electronic modules / A.V. Turetsky, O.Y. Makarov, M.A. Romashchenko, P.P. Churakov, I.S. Bobylkin // International Journal of Control Theory and Applications. 2016. Т. 9. № 30. С. 227-239.
6. Analysis of Snubber-clamped Diode-string Mixed Voltage Interface ESD Protection Network for Advanced Microprocessors/ S. Voldman, G. Gerosa, V. Gross, N. Dickson, S. Furkay, J. Slinkman // Journal of Electrostatics. 1995. Т. 38. С. 3–31.
7. Ker M., Chen T. Design on the Turn-on Efficient Power-rail ESD Clamp Circuit with Stacked Poly-silicon Diodes // ISCAS. 2001. С. 758–761.
8. Study of ESD Behavior of Different Clamps Configuration in a 0.35 μm CMOS Technology/ C. Richer, N. Maene, G. Mabboux, R. Bellens // EOS/ESD Symposium. 1997. С. 240–245.
9. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М.: Изд. дом «Технологии», 2005. С. 265-291.

Поступила 15.10.2019; принята к публикации 10.12.2019

Информация об авторах

Ромащенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kipt@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Сеимова Дарья Сергеевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: dashyli98@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

Рожненко Сергей Николаевич – технический директор АО ВЦКБ «Полюс» (394019, Россия, г. Воронеж, ул. Краснодонская, 16Б), e-mail: rsn@vckb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

PRINCIPLES OF PROTECTION OF PRINTED ELECTRONIC MODULES FROM ELECTROSTATIC DISCHARGE AT THE STAGES OF PRODUCTION AND TESTING

M.A. Romashchenko¹, D.S. Seimova¹, S.N. Rozhenko²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²JSC VCCB "Pole", Voronezh, Russia

Abstract: protection from static electricity is currently one of the most important tasks of any activity in the field of design and production of electronic devices. Awareness of the risks associated with the influence of surge voltages, including electrostatic discharge, and the application of methods of protection from their effects are becoming increasingly important for many enterprises working in the field of electronic industry. Structures of electronic components become more sensitive to the occurrence of electrostatic discharges with the modernization of technology. 5 volts of electrostatic discharge is enough to change the internal structures of small electronic components. Growing trends towards miniaturization lead to the fact that the cases of some elements of the printed module are so small that even a minimal exposure to an electrostatic pulse can cause permanent damage to the device as a whole. Electrostatic discharge is a known factor contributing to a decrease in the reliability and performance of electronic devices. This article presents a methodology for implementing mechanisms for protecting printed modules of electronic devices from electrostatic discharge in CMOS technologies

Key words: electrostatic discharge (ESD), printed circuit board (PCB), electronic devices (ED), printed module

References

1. Seimova D.S., Romashchenko M.A. "Improving the effectiveness of methods for testing electronic devices for resistance to electrostatic discharge", *Proc. of the winners of the research competition of students and postgraduates of VSTU in priority areas of development of science and technology (Sbornik trudov pobediteley konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov i aspirantov VGTU po prioritnym napravleniyam razvitiya nauki i tekhnologii)*, 2019, pp. 236-238.
2. Glotov V.V., Ostroumov I.V., Romashchenko M.A. "Development of models simulating operation of elements of radio devices, for solving problems of ensuring electromagnetic compatibility of radio electronic means", *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, pp. 032172.
3. Romashchenko M.A., Seimova D.S. "The basic principles of research on the effect of electrostatic discharges on the element base", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 133-137.
4. Zhadnov V.V. "The effect of electrostatic discharges on the maintainability of electronic devices", *Technologies of Electro-magnetic Compatibility (Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti)*, 2015, no. 4, pp. 29-34.
5. Turetsky A.V., Makarov O.Y., Romashchenko M.A., Churakov P.P., Bobylkin I.S. "Procedure of complex analysis of mechanical properties of printed circuit boards in electronic modules", *International Journal of Control Theory and Applications*, 2016, vol. 9, no. 30, pp. 227-239.
6. Voldman S., Gerosa G., Gross V., Dickson N., Furkay S., Slinkman J. "Analysis of snubber-clamped diode-string mixed voltage interface ESD protection network for advanced microprocessors", *Journal of Electrostatics*, 1995, vol. 38, pp. 3-31.
7. Ker M., Chen T. "Design on the turn-on efficient power-rail ESD clamp circuit with stacked poly-silicon diodes", *ISCAS*, 2001, pp. 758-761.
8. Richer C., Maene N., Mabboux G., Bellens R. "Study of ESD behavior of different clamps configuration in a 0.35 μ m CMOS technology", *EOS/ESD Symposium*, 1997, pp. 240-245.
9. Kechiev L.N., Pozhidaev E.D. "Protection of electronic means from the effects of static electricity" ("Zashchita elektronnykh sredstv ot vozdeystviya staticheskogo elektrichestva"), Moscow, Tekhnologiya, 2005, pp. 265-291.

Submitted 15.10.2019; revised 10.12.2019

Information about the authors

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia) e-mail: kpr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Dar'ya S. Seimova, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: dashyli98@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

Sergey N. Rozhenko, Technical Director, JSC VCCB "Pole" (16B Krasnodonskaya st., Voronezh 394019, Russia), e-mail: rsn@vccb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

АКТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ КАНАЛА РАДИОСВЯЗИ В СИСТЕМЕ ПОДВИЖНЫХ АБОНЕНТОВ С ВЫСОКОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

О.Н. Чирков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается проблема оценки канала в системах связи «автомобиль-автомобиль» с поддержкой 5G в условиях высокой скорости перемещения и изменяющихся характеристик среды передачи. Для обеспечения надежной и высокоскоростной беспроводной связи 5G в условиях автомагистрали важно обеспечить точную оценку канала радиосвязи. Для улучшения характеристик оценки и повышения помехоустойчивости систем мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM) применен расширенный фильтр Кальмана в сочетании с итеративным детектором и декодером в приемнике. Расширенный фильтр Кальмана предложен для совместной оценки частотной характеристики канала и коэффициентов временной корреляции. Для построения более точной матрицы весов фильтра использована итеративная структура приемника на основе апостериорного логарифмического отношения правдоподобия (ЛОП). Применение итеративного подхода в приемном тракте позволит снизить ошибки оценки в расширенном фильтре Кальмана. Моделирование нестационарных каналов радиосвязи в системе подвижных объектов с высокой скоростью перемещения проведено в пакете MatLab. Результаты моделирования показывают, что предложенный подход итеративной оценки канала с расширенным фильтром Кальмана систем OFDM в средах с высокой мобильностью абонентов повышает эффективность оценки канала по сравнению с традиционными методами более чем на 3 дБ

Ключевые слова: оценка канала, фильтр Кальмана, детектор, декодер, итеративная оценка, подвижный абонент

Введение

В современном мире автомобиль перестал быть просто средством передвижения из пункта А в пункт Б и превратился в интеллектуальное транспортное средство, способное без участия водителя перемещаться по автодорогам. В связи с быстрым распространением таких автомобилей по всему миру, все большее внимание уделяется исследованиям в области интеллектуальных транспортных средств, совместимых с 5G [1]. Для обеспечения надежной и высокоскоростной беспроводной связи 5G в условиях автомагистрали важно обеспечить точную оценку канала радиосвязи. Так канал «автомобиль-автомобиль» с системной точки зрения представляет собой изменяющуюся во времени динамическую систему, характеризующую своим откликом. В свою очередь, оценка канала связи такой среды является проблемой анализа состояния системы, в которой отклик радиоканала является переменной величиной. Однако в среде с высокой мобильностью «автомобиль-автомобиль» отклик канала является нестационарным, а коэффициенты корреляции изменяются во времени, поэтому достаточно сложно точно оценить информацию о состоянии канала радиосвязи. Таким образом, традиционные методы оценки канала на основе стандартного фильтра Кальмана (ФК) неприменимы в систе-

мах с высокой мобильностью. Но с другой стороны, оценка также зависит от точности весовой матрицы измерений ФК. Для построения более точной матрицы весов в [2] было предложено использовать итеративную структуру приемника на основе апостериорного логарифмического отношения правдоподобия (ЛОП).

Для совместной оценки частотной характеристики канала и изменяющихся во времени коэффициентов корреляции в системах «автомобиль-автомобиль» в статье предложен расширенный фильтр Кальмана с итеративной оценкой канала радиосвязи. Предложенная методика позволит повысить производительность оценки канала за счет избыточности канального кодирования.

Модель канала

Для сред с высокой мобильностью нестационарный канал можно представить как изменяющийся во времени процесс авторегрессии. Рассмотрим OFDM систему из M символов с N поднесущими, N_p пилот-сигналами в одном подкадре [3, 4]. Изменяющийся во времени авторегрессионный процесс первого порядка для нестационарного канала можно выразить как

$$h_i = A_{i-1}h_{i-1} + n_{i-1}, \quad (1)$$

где $A_{i-1} = \text{diag}[a_{i-1,1}, \dots, a_{i-1,N_p}]$ - это матрица перехода состояний частотной характеристики канала для $(i-1)$ -го OFDM символа; $a_{i-1,k}$ - это коэффициент временной корреля-

ции отклика канала на k -й поднесущей для i -го OFDM символа; h_{i-1} – вектор частотной характеристики канала на пилотных поднесущих i -го OFDM символа; n_{i-1} – гауссов комплексный белый шум с нулевым средним.

Коэффициент временной корреляции $a_{i,k}$ в стационарном канале с нормализацией мощности согласно модели Кларка может быть выражен как

$$a_{i,k} = J_0(2\pi f_d N T_s), \quad (2)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; f_d обозначает максимальную доплеровскую частоту, а T_s – интервал выборки системы. Для нестационарного канала «автомобиль-автомобиль» $a_{i,k}$ является изменяющимся во времени параметром, связанным с интервалом $N T_s$ соседних символов.

Обозначим $x_i(k)$ передаваемый символ на k -й пилотной поднесущей, а вектор переданных пилот-символов $x_i = [x_i(1), \dots, x_i(N_p)]^T$. Предполагаем, что импульсная характеристика канала в OFDM символе постоянна, отсюда матрица канала равна $H_i = \text{diag}(h_i)$. Модель системы радиосвязи запишется как

$$y_i = H_i x_i + n_i, \quad (3)$$

где $y_i = [y_i(1), \dots, y_i(N_p)]^T$ обозначает вектор принятых символов на пилотных поднесущих i -го OFDM-символа, n_i – аддитивный комплексный гауссов.

Расширенный фильтр Кальмана

Для отслеживания характеристик нестационарного канала с высокой мобильностью изменяющаяся во времени матрица перехода состояний A_i оценивается вместе с откликом канала h_i . Тогда модель канала (1,3) можно расширить до пространства:

$$\begin{cases} a_i = a_{i-1} + \varepsilon_{i-1} \\ h_i = A_{i-1} h_{i-1} + n_{i-1}, \\ y_i = H_i x_i + n_i \end{cases} \quad (4)$$

где ε_{i-1} обозначает технологический шум от a_i (независимый гауссовский шум с нулевым средним с ковариацией Q_ε).

Для совместной оценки частотной характеристики канала и изменяющихся во времени коэффициентов корреляции введем матрицу:

$$z_i = [a_i^T \ h_i^T]^T. \quad (5)$$

Отсюда пространственная модель состояний канала (4) превращается в систему

$$\begin{cases} z_i = f(z_{i-1}) + u_{i-1} \\ y_i = [0 \ X_i] z_i + n_i \end{cases} \quad (6)$$

где $u_i = [\varepsilon_i^T \ n_i^T]^T$, а нелинейная функция перехода состояния

$$f(z_{i-1}) = \begin{bmatrix} a_{i-1} \\ A_{i-1} h_{i-1} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Применяя аппроксимацию Тейлора первого порядка к нелинейной функции перехода состояния вокруг $z_{i-1} = \hat{z}_{i-1}$ в (7), пространство (6) примет вид:

$$\begin{cases} z_i = F_{i-1} z_{i-1} + u_{i-1} \\ y_i = [0 \ X_i] z_i + n_i \end{cases}. \quad (8)$$

Предложенный алгоритм для совместной оценки коэффициентов частотной характеристики канала h_i и временной корреляции a_i работает в цикле прогнозирования-коррекции. Текущие оценки z_{i-1} и ковариация ошибок P на $(i-1)$ -ом OFDM символе используются для получения априорных оценок

$$z_{i|i-1} = \begin{bmatrix} a_{i-1} \\ A_{i-1} h_{i-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P_{i|i-1} = F_{i-1} P_{i-1} F_{i-1}^H + Q_n. \quad (10)$$

Корректор использует априорные оценки $z_{i|i-1}$ и $P_{i|i-1}$ для улучшения апостериорных оценок с использованием фактического измерения принятого символа y_i в i -м OFDM сигнале

$$z_i = z_{i|i-1} + K_i (y_i - [0 \ X_i] z_{i|i-1}) \quad (11)$$

$$P_i = P_{i|i-1} - K_i [0 \ X_i] P_{i|i-1}, \quad (12)$$

где K_i – усиление Кальмана.

Для повышения точности оценки канала применим обратную связь с апостериорным логарифмическим отношением правдоподобия. Апостериорные ЛОП $L_a(c_i)$ от декодера преобразуются в битовые вероятности с помощью следующего уравнения:

$$p(c_i = 1) = \frac{e^{L_a(c_i)}}{1 + e^{L_a(c_i)}}. \quad (13)$$

Закодированные биты статистически независимы, поэтому можно определить вероятности:

$$p(x_i(k) = S_m) = \prod_{l=0}^{\log_2 M - 1} p(c_l = b_l), \quad (14)$$

где S_m – модулированный символ, соответствующий битовой последовательности $\{b_1, \dots, b_{\log_2 M}\}$, $\log_2 M$ – порядок модуляции. При декодировании символ с наибольшей вероятностью $p(x_i(k) = S_m)$ выбирается из элементов алфавита модуляции:

$$\hat{x}_i(k) = \arg \max_{S_m} p(x_i(k) = S_m). \quad (15)$$

Тогда диагональная матрица $\hat{X}_i$, состоящая из символов обратной связи по ЛОП, будет представлять собой матрицу весов расширенного фильтра Кальмана. $\hat{X}_i$ будет ближе к фактическим символам, следовательно, уменьшит ошибку оценки.

$$\hat{X}_i = \text{diag}([x_i(1), \dots, x_i(N_p)]^T). \quad (16)$$

Итеративная оценка

На рис. 1 приведена блок-схема представленного итеративного приемника с расширенным фильтром Кальмана для оценки канала связи OFDM. На первом этапе в качестве предварительной оценки используется метод наименьших квадратов (LS) [5], как самый эффективный с точки зрения сложности расчетов и характеристик битовой ошибки. После обнаружения априорные значения ЛОП каждого бита выводятся детектором и подаются в декодер. Декодер исправляет биты ошибок, и апостериорные ЛОП $L_a(c_i)$ используются для обновления весовой матрицы. Далее инициализируется расширенный фильтр Кальмана. На втором этапе частотная характеристика канала оценивается и интерполируется расширенным фильтром Кальмана с итеративным циклом прогнозирования-коррекции. Априорная оценка состояния вычисляется с помощью (9) и (10). При итерации $\hat{X}_i$ возвращается в расширенный фильтр Кальмана для вычисления апостериорной оценки состояния z_i по (11) и (12). Затем детектор переходит на стадию обновления. Итерации продолжаются до тех пор, пока не будет выведен искомый битовый поток.

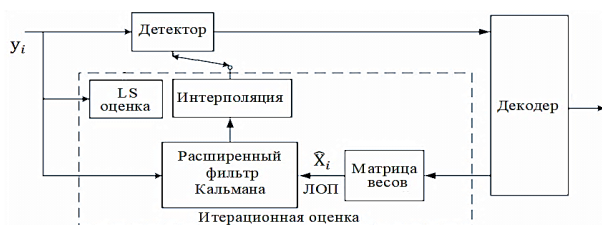


Рис. 1. Блок-схема итеративного приемника с расширенным фильтром Кальмана

Результаты моделирования

Для проверки эффективности предложенной итеративной оценки канала с расширенным фильтром Кальмана систем OFDM в среде с высокой мобильностью абонентов было проведено моделирование в пакете Matlab. Для настройки нестационарного канала с аддитивным белым гауссовским шумом была использована модель высокоскоростного канала WINNER-II D1 [6]. Пропускная способность системы составляет 5 МГц, а общее количество поднесущих $N = 300$. Система работает на частоте 2,8 ГГц. Используется модуляция 16-QAM [7]. Число итераций декодирования - 6.

На рис. 2 представлена характеристика среднеквадратичной ошибки MSE от отношения сигнал/шум SNR для оценщиков на основе:

наименьших квадратов (LS) [8], традиционного фильтра Кальмана (ФК) и предложенного итерационного приемника с расширенным фильтром Кальмана. Высокоскоростная мобильная среда описывается скоростью 300 км/ч. Характеристики среднеквадратичной ошибки трех методов очень близки при моделировании на скорости 50 км/ч. По сравнению с оценкой на основе ФК среднее усиление SNR итерационного подхода составляет менее 2 дБ, так как замирание канала является плоским в условиях низкой мобильности. Однако усиление сигнал/шум при итеративной оценке канала с расширенным фильтром Кальмана составляет уже более 2 дБ по сравнению с ФК на скорости 300 км/ч. В средах с высокой скоростью перемещения простой ФК не может отслеживать изменения нестационарного канала, поскольку свойство временной корреляции отклика канала между двумя символами пилот-сигнала является фиксированным. Напротив, итерационная методика с расширенным фильтром Кальмана позволяет регулировать матрицу перехода состояний во времени с разнесением во временной области канала. Следовательно, такая оценка канала достигает более высокой точности в средах с высокой скоростью перемещения.

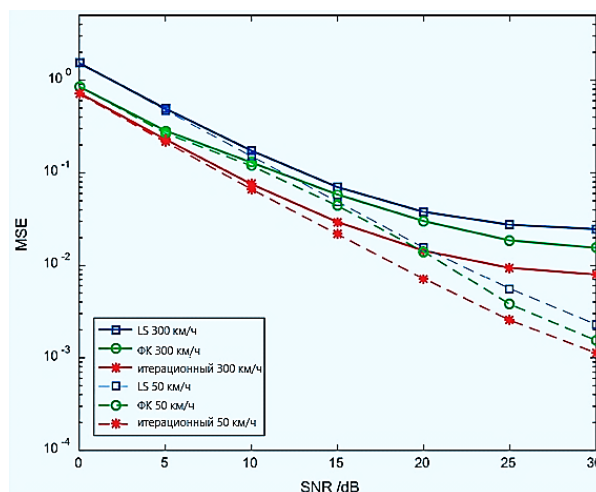


Рис. 2. Характеристика MSE при скорости перемещения 50 км/ч и 300 км/ч

На рис. 3 и 4 показан коэффициент ошибок по битам (BER) для оценки наименьших квадратов, оценки радиоканала на основе фильтра Кальмана и итеративной оценки канала с расширенным фильтром Кальмана при 50 км/ч и 300 км/ч соответственно. При скорости 50 км/ч, по сравнению с методом LS, среднее усиление SNR для оценки на основе ФК составляет 2 дБ, а усиление отношения сигнал/шум в предложенной итерационной методике составляет 3 дБ.

Однако в системе с высокой мобильностью (рис. 4), в отличие от метода ФК, усиление SNR составляет уже более 3 дБ по битовой ошибке. Очевидно, что использование коэффициентов временной корреляции как постоянных нецелесообразно в нестационарном канале. Это ограничивает производительность оценки канала. С помощью предложенного итеративного подхода на основе расширенного фильтра Кальмана можно регулировать матрицу перехода состояний с изменяющимся во времени радиоканале и строить измерительную матрицу весов для получения более точных оценок с ЛОП.

Заключение

Для каналов с высокой скоростью перемещения «автомобиль-автомобиль» с поддержкой 5G предложена методика совместной оценки обнаружения и декодирования радиоканала на основе расширенного фильтра Кальмана и итерационного подхода. Предложенный алгоритм подходит для оценки нестационарного канала, так как позволяет совместно оценить коэффициенты частотной характеристики канала и временной корреляции. Результаты моделирования показывают, что предложенный подход итеративной оценки канала с расширенным фильтром Кальмана систем OFDM в средах с высокой мобильностью абонентов повышает эффективность оценки канала по сравнению с традиционными методами на 3 и более дБ.

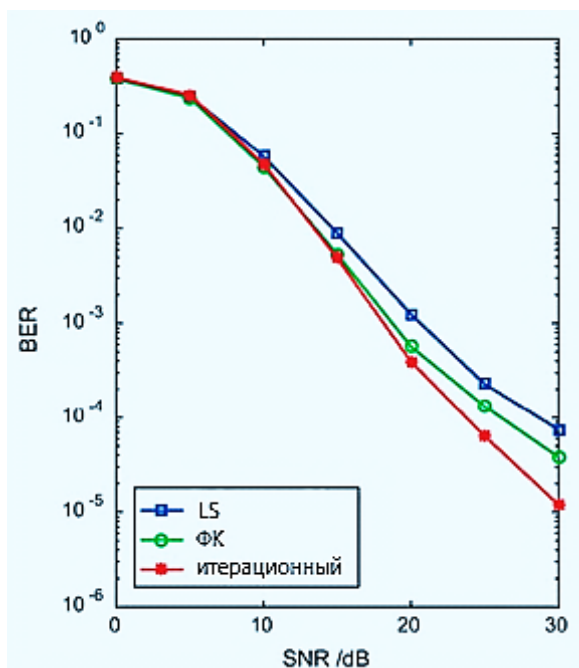


Рис. 3. Характеристика BER при скорости 50 км/ч

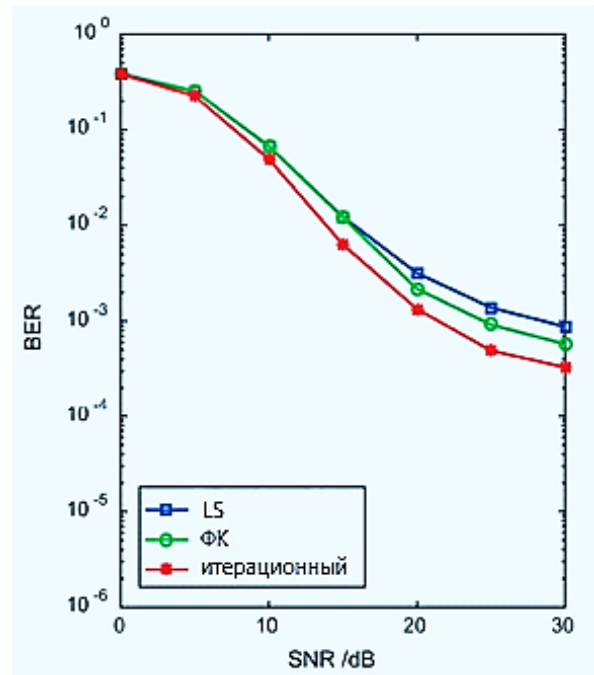


Рис. 4. Характеристика BER при скорости 300 км/ч

Литература

1. 5G-Enabled Cooperative Intelligent Vehicular (5GenCIV) Framework: When Benz Meets Marconi/ X. Cheng, C. Chen, W. Zhang, and Y. Yang // IEEE Intelligent Systems. 2017. Vol. 32. № 3. Pp. 53-59.
2. Simon E., Khalighi M. Iterative Soft-Kalman Channel Estimation for Fast Time-Varying MI- MO-OFDM Channels // IEEE Wireless Commun.Letters. 2013. Vol. 2. № 6. Pp. 599-602.
3. Чирков О.Н. Эффективный алгоритм динамического распространения пилот-сигналов для оценки канала радиосвязи в многоантенных системах MIMO с ортогональным частотным уплотнением OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 163-168.
4. Чирков О.Н., Ромащенко М.А., Чепелев М.Ю. Современные методы оценки канала радиосвязи в условиях многолучевости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 68-73.
5. Пилотная оценка канала радиосвязи в MIMO-OFDM системах/ О.Н. Чирков, М.А. Ромащенко, И.С. Бобылкин, Р.Н. Щипелев, А.А. Матвеев // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2019. Т. 2. С. 87-90.
6. Wideband Channel Modeling and ICI Cancellation for Vehicle-to-Vehicle Communication Systems / Q. Yao, X. Cheng, M. Wen, C.-X. Wang, L. Song, B. Jiao // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2013. Vol. 31. № 9. Pp. 434-448.
7. Чирков О.Н., Кузнецова А.О. Итеративная методика помехоустойчивого приема QAM-сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4. С. 84-88.
8. Чирков О.Н., Ромащенко М.А., Чураков П.П. Усовершенствованный метод оценки канала с итерационным подавлением помех для многопользовательских систем MIMO-OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 150-155.

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич - старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

ACTUAL APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF THE RADIO COMMUNICATION CHANNEL IN THE SYSTEM OF MOBILE SUBSCRIBERS WITH A HIGH SPEED OF MOVEMENT

O.N. Chirkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article discusses the problem of channel estimation in “car-to-car” communication systems with 5G support under conditions of high speed of movement and changing characteristics of the transmission medium. In order to provide reliable and high-speed 5G wireless communications in a highway environment, it is important to provide an accurate estimate of the radio channel. To improve the evaluation characteristics and increase the noise immunity of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems, an advanced Kalman filter is used in combination with an iterative detector and a decoder in the receiver. An advanced Kalman filter is proposed for joint estimation of the channel frequency response and time correlation coefficients. To construct a more accurate matrix of the filter weights, the iterative structure of the receiver is used based on the posterior logarithmic likelihood ratio (LLR). Using an iterative approach in the receive path will reduce the estimation errors in the extended Kalman filter. Modeling of non-stationary radio channels in a system of moving objects with a high speed of movement was carried out in the MatLab package. The simulation results show that the proposed iterative channel estimation approach with an extended Kalman filter of OFDM systems in environments with high subscriber mobility increases the channel estimation efficiency by 3 or more dB compared to traditional methods

Key words: channel estimation, Kalman filter, detector, decoder, iterative estimation, mobile subscriber

References

1. Cheng X., Chen C., Zhang W., Yang Y. “5G-enabled cooperative intelligent vehicular (5GenCIV) framework: when Benz meets Marconi”, *IEEE Intelligent Systems*, vol. 32, no. 3, May/June 2017, pp. 53-59.
2. Simon E., Khalighi M. “Iterative soft-Kalman channel estimation for fast time-varying ML-MO-OFDM channels”, *IEEE Wireless Commun. Letters*, 2013, vol. 2, no. 6, pp. 599-602.
3. Chirkov O.N. “An effective algorithm for the dynamic propagation of pilot signals for estimating a radio channel in multi-antenna MIMO systems with orthogonal frequency division multiplexing OFDM”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 163-168.
4. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Chepelev M.Yu. “Modern methods for evaluating the radio channel in multipath”, *Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 68-73.
5. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S., Shchipelev R.N., Matveev A.A. “Pilot assessment of the radio channel in MIMO-OFDM systems”, *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, Penza State University, 2019, vol. 2, pp. 87-90.
6. Yao Q., Cheng X., Wen M., Wang C.-X., Song L., Jiao B. “Wideband channel modeling and ICI cancellation for vehicle-to-vehicle communication systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, vol. 31, no. 9, pp. 434-448.
7. Chirkov O.N., Kuznetsova A.O. “An iterative technique for noise-immunity reception of QAM signals”, *Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 84-88.
8. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Churakov P.P. “An improved method for channel estimation with iterative noise reduction for multi-user MIMO-OFDM systems”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 150-155.

Submitted 01.10.2019; revised 10.12.2019

Information about the author

Oleg N. Chirkov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫХ АНТЕНН С ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ, ПРИБЛИЖАЮЩЕЙСЯ К ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ В СООТВЕТСТВИИ С КРИТЕРИЕМ ЧУ-ХАРРИНГТОНА-ЛИ

Ю.Г. Пастернак, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров, М.А. Сиваш

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: на основе анализа открытых научно-технических литературных источников проведен анализ современных подходов к созданию электрически малых антенн. Описаны важнейшие характеристики, определяющие полосу рабочих частот антенны и её КПД. Приведены результаты исследования добротности электрически малых антенн в зависимости от типа возбуждаемых мод, а также приведены полученные математические выражения для электрически малых антенн оценки добротности. Рассмотрены способы учета потерь в электрических характеристиках антенн. Приведен пример использования электрически малых антенны из половины петли (и схожих конструкций) для установки на различную военную технику, а также представлены графические зависимости, характеризующие влияние размера антенн от числа половин колец. В работе рассмотрен вопрос использования метаматериалов: применение в качестве оболочки для компенсации высокой реактивности, реализация полосковых антенн различных конструкций, применение разорванных кольцевых резонаторов, создание дипольной электрически малой антенны. Также описаны различные способы уменьшения размеров дипольных антенн: реализация вибратора с различной формой плеч (например, древовидной). Представлены различные варианты конструкций спиральных антенн: плоские и объемные, а также приведены некоторые способы их улучшения

Ключевые слова: электрически малые антенны, добротность, КПД, полоса пропускания

Введение

В настоящее время при разработке и эксплуатации радиопередающих и радиоприемных устройств, например, для бортовых и наземных систем связи, актуальными являются требования, связанные с минимизацией размеров этих технических средств, что открывает большие возможности для их практического использования. Активное развитие данной тематики связано не только с сугубо научным интересом к созданию минимально достижимого размера антенн, но и с развитием материаловедения и новыми технологическими возможностями по производству антенн, прогрессу в области прикладной вычислительной электродинамики, а также с возросшими вычислительными мощностями.

Первые работы, посвященные проектированию электрически малых антенн, появились в середине 20 века [1, 2]. В это же время сформулированы исключительно важнейшие фундаментальные ограничения на основные параметры электрически малых антенн [3-6], не подвергавшиеся сомнению вплоть до публикации [7], появившейся в 1996 году, в которой поставлены под сомнения установленные ограничения [8]. В подтверждение установленных ограничений

можно привести доводы профессора Граймса Пенсильванского университета [9, 10]: размеры атома, по крайней мере, интуитивно, составляют примерно 0,1 нм, а длина волны его излучения равна 500 нм. Таким образом, отношение размера атома к длине волны равно 1:5000. Иными словами, это в 500 раз меньше, чем соответствующий параметр для реально созданных на настоящий момент антенн [8].

Одной из наиболее важных характеристик антенны, определяющей полосу рабочих частот, является ее добротность излучения [8]. Классический подход к определению добротности произвольной антенны состоит в следующем: предполагается, что антенна целиком вмещается в гипотетическую сферу радиуса a [8]. Рассчитываются запасенные вне указанной сферы электрическая W'_e и магнитная W'_m энергии, а также мощность излучения P антенны [8]. Энергиями, запасенными внутри сферы, и потерями в антенне пренебрегают, и расчет добротности Q проводят по формуле (1):

$$Q = \begin{cases} \frac{2\omega W'_e}{P}, W'_e > W'_m \\ \frac{2\omega W'_m}{P}, W'_m > W'_e \end{cases} \quad (1)$$

Реализация такого подхода в работах [3, 4, 5, 7] позволила установить фундаментальное ограничение. Согласно ему, Q не может превосходить значения для линейно и круговых поляризованных ТЕ и ТМ волн:

$$Q = \frac{1}{ka} + \frac{1}{(ka)^3} \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{ka} + \frac{1}{2(ka)^3}, \quad (3)$$

где ka – электрический радиус сферы.

Сиенпайпер и др. в [14] предположили, что вместо вычисления добротности Q можно использовать соотношение (4) в качестве критерия для проектируемых антенн:

$$B\eta_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{ka} + \frac{1}{2(ka)^3} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где B – полоса пропускания антенны, η_r – КПД антенны. Число n определяется с помощью типа волны, распространяющейся от антенны [14]. При n равном 1 уравнение называют уравнением первого порядка, при n равном 2 – второго порядка. Таким образом, при реализации электрически малых антенн появляется неоднозначность: широкополосные антенны обладают низким КПД, а узкополосные – высоким КПД.

Кольцевые антенны

Электрически малые кольцевые антенны (в литературе можно найти обозначение “магнитное кольцо”) имеют диаметр меньше одной десятой длины волны [15]. Из-за своих малых размеров такие антенны нашли широкое применение в различных отраслях. Например, такие антенны нашли широкое применение в использовании в авиатехнике, кораблях, автомобилях [15]. В работе [16] рассматривается применение электрически малых антенн из половины петли (и схожих конструкций) для установки на различную военную технику (показано на рис. 1).

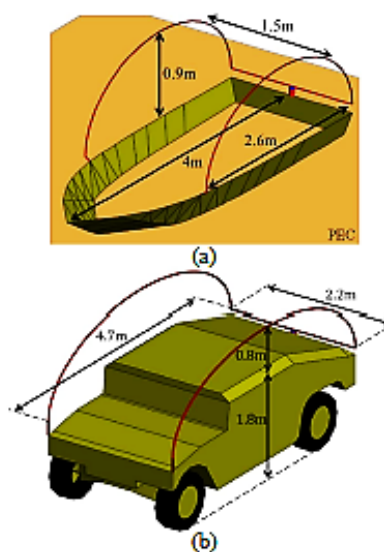


Рис. 1. Установка электрически малых антенн из половины петли на лодку (а), военный джип (б)

Также в работе [13] представлены графические зависимости, характеризующие влияние размера антенн от числа половин колец (рис. 2).

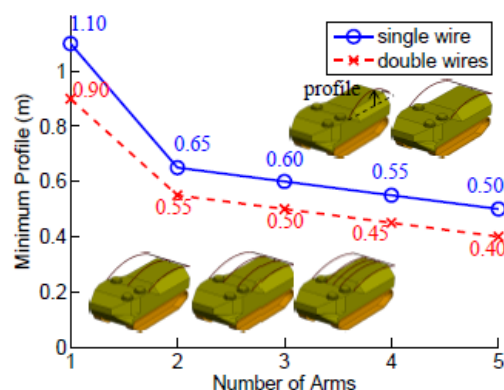


Рис. 2. Влияние размера антенн от числа половин колец

Учет потерь

В работе [17] приводятся способы решения актуальной задачи при создании электрических антенн – учета потерь. В качестве исследуемой антенны авторы использовали кольцевую антенну с тороидальным трансформатором, предназначенным для вычисления импеданса антенны. Также приведены различные потери и математические выражения для их оценки. Ниже приведено математическое выражение для учета сопротивлений (5):

$$R_{tot} = R_{rad} + R_{loop} + R_{cap} + R_{gnd} + R_{cap} \quad (5)$$

R_{tot} – общее сопротивление антенны, R_{rad} – сопротивление излучения, R_{loop} – сопротивление, учитывающее скин-эффект проводника кольца, R_{cap} – сопротивление конденсатора, R_{gnd} – сопротивление, связанное с наводками на землю.

Расчет сопротивлений R_{rad} и R_{loop} производится по стандартным выражениям [17], а при расчете сопротивления, связанного с наводками на землю, требуется учет влияний диэлектрической проницаемости среды, ее проводимости. На рис. 3 показан эффект изменения сопротивления, связанного с наводками на землю.

На рис. 3 отображены значения сопротивления, рассчитанного через компьютерные вычисления (использующие метод моментов) и по методике из [15], а также рассчитанные R_{rad} и R_{loop} . Влияние земли на характеристики антенн отображено и в [16].

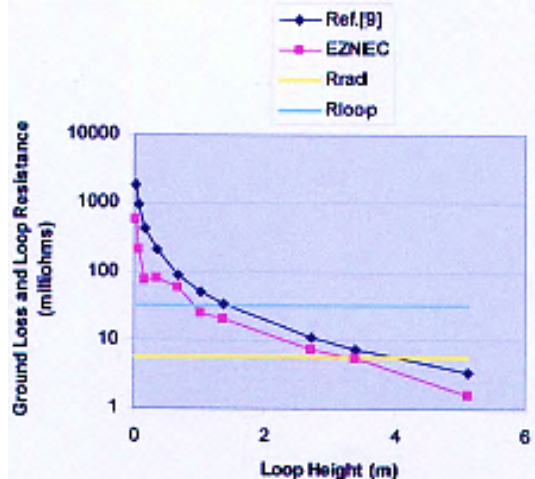


Рис. 3. Эффект изменения сопротивления, связанного с наводками на землю, а также рассчитанные R_{rad} и R_{loop} .

На рис. 4 приведена зависимость эффективности излучения от частоты для различной толщины колец.

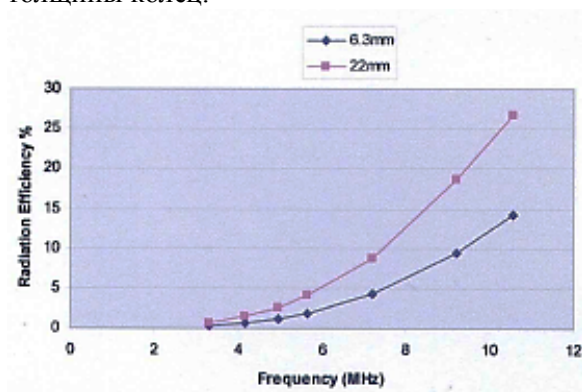


Рис. 4. Эффективности излучения от частоты для различной толщины колец

Применение метаматериалов

Другой возможный способ уменьшения размеров кольцевых антенн описан в [15] – магнитный монополь окружен дополнительным емкостным экраном (рис. 5,а), а как указано в [20, 21], такой способ применим и для уменьшения размеров монопольных антенн.

Основная идея использования такой оболочки – компенсация высокой реактивности магнитного (рис. 5,а) или электрического монополя (рис. 5,б) дополнительной емкостью, окружающей его оболочки, или индуктивностью для электрического монополя (рис. 6), при этом такая оболочка обладает свойствами метаматериалов [17, 18]. Её толщина может быть меньше сотых долей длины волны в свободном пространстве, что не приводит к заметным затуханиям электромагнитного поля [17, 18].

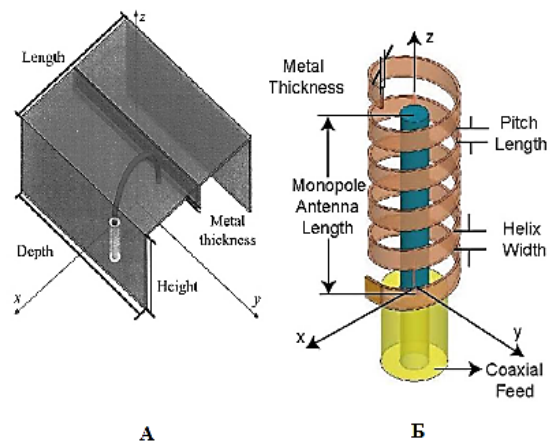


Рис. 5. Магнитный монополь в металлической оболочке (а), электрический монополь в спиральной оболочке (б)

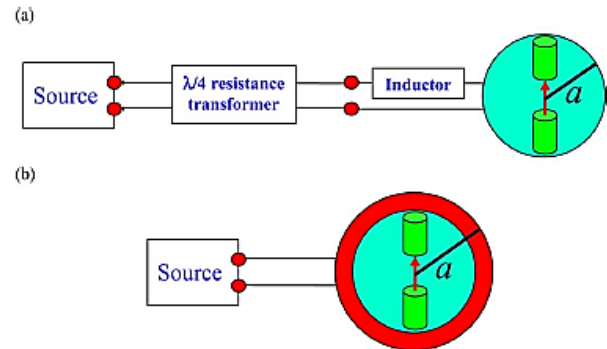


Рис. 6. Традиционная электрически малая антенна, имеющая индуктивный элемент для компенсации реактивности (а), компенсация реактивности ENG оболочкой (б)

Бурное развитие метаматериалов способствовало их применению и при создании электрически малых антенн не только в качестве оболочек, но и в виде самостоятельных антенн [15, 20-23]. Наличие математического аппарата по анализу периодических структур для создания метаматериалов позволило создавать различные конструкции антенн. Например, на рис. 7 показано сравнение размеров обычной полосковой антенны с полосковой антенной, в которой реализованы свойства метаматериалов.

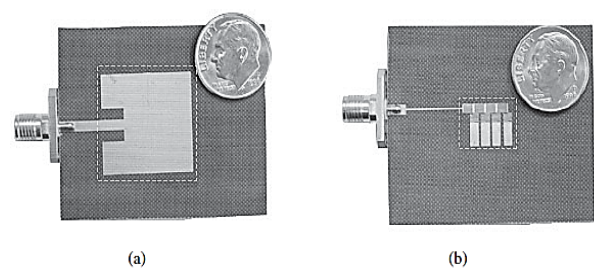


Рис. 7. Обычная полосковая антенна (а), полосковая антенная со свойствами метаструктур (б)

Развитие анализа периодических структур способствовало возможности создания не только одномерных антенн, показанных на рис. 7, но и более сложной – двумерной структуры [15, 20-23]. Примеры таких антенн, форма которых напоминает грибовидную, показаны на рис. 8.

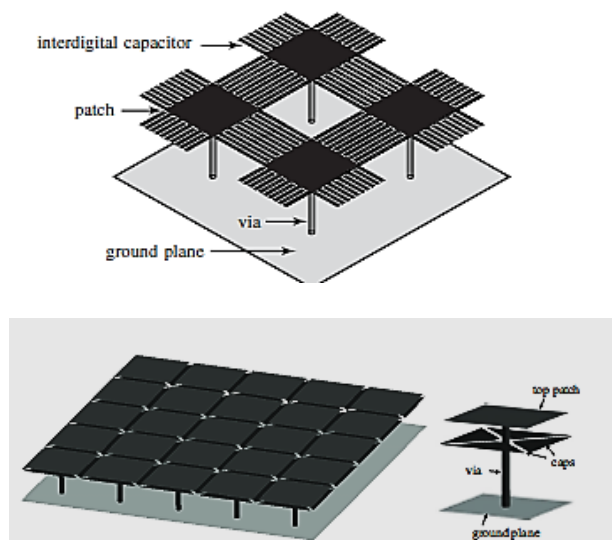


Рис. 8. Примеры реализации двумерных структур

Другой немаловажный пример использования метаматериалов показан в [24]. Авторы уменьшили размер дипольной антенны, реализовав ее на периодической структуре, обладающей свойствами метаматериалов. На рис. 9 показан внешний вид спроектированной антенны.

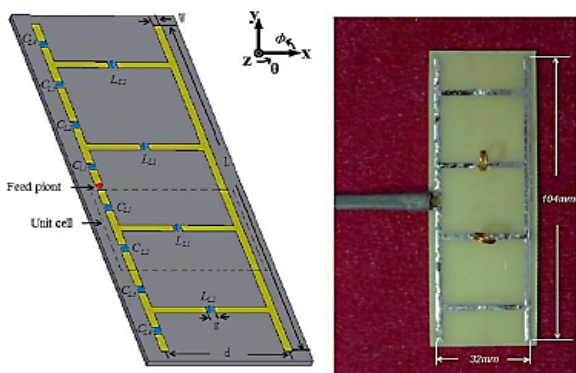


Рис. 9. Внешний вид антенны

Применение разорванных кольцевых резонаторов для создания электрически малых антенн отображено в [26]. За счет сильного магнитного взаимодействия между резонаторами составной резонатор имеет частоту резонанса, на которой длина волны намного больше его собственных размеров, что позволяет создать электрически малую антенну [26]. На рис. 10

показан внешний антенны, а также проиллюстрировано распределение поля в зависимости от числа резонаторов.

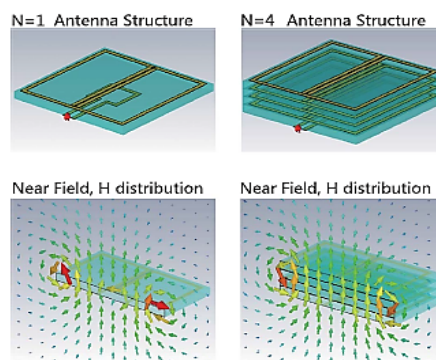


Рис. 10. Внешний вид антенны и распределение поля при разном числе резонаторов

Дипольные антенны

Электрически малые дипольные антенны могут быть реализованы не только на метаматериалах. Более простые варианты реализации описаны в [15, 23, 27]. Например, одним из способов реализации печей вибратора может быть меандровая линия. Такие антенны нашли широкое применение во многих отраслях: мобильные гаджеты, беспроводные каналы передачи данных и др. Принцип работы можно понять непосредственно из самого вида антенны. Каждая секция состоит из горизонтальных и вертикальных проводников, ширина каждой секции w , длина пути протекания тока для каждой секции $2(l + w)$, тогда как без меандра l . Из-за этого и увеличивается электрическая длина антенны. На рис. 11,а показан внешний вид вибратора с плечами в виде меандра. Плечи вибратора можно выполнить не только в виде меандра, но и в другой форме (рис. 11,б). Работа [27] посвящена анализу характеристик вибраторов с различными формами плеч.

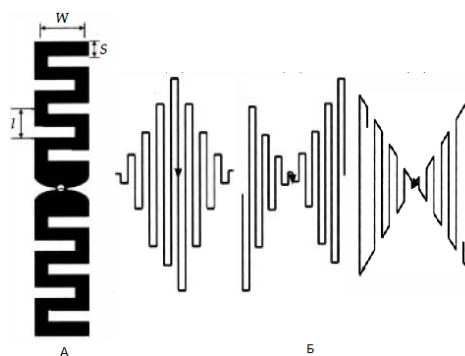


Рис. 11. Плечи вибратора в виде меандра (а), плечи вибратора в другой форме (б)

Возможна и реализация не только плоских вибраторных антенн, но и объемных структур, например, древовидных [23]. На рис. 12 проиллюстрирована эволюция древовидной структуры вибратора.

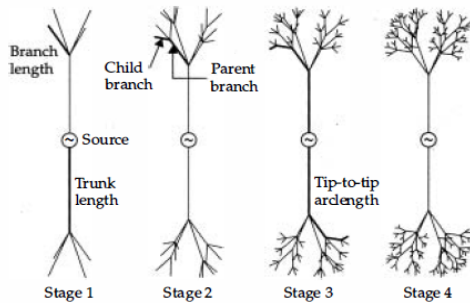


Рис. 12. Древовидная структура плечей вибратора

Спиральные антенны

В [28] реализован четвертьволновой монополюс в виде одновитковой спиральной микрополосковой антенны, состоящей из набора симметричных прямоугольных небольших сегментов, соединенных вместе на обеих сторонах FR-4. На рис. 13 приведен внешний вид антенны.

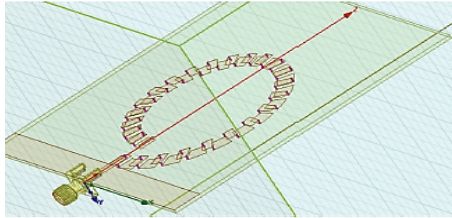


Рис. 13. Внешний вид одновитковой спиральной микрополосковой антенны

Спиральные электрические антенны имеют различные конструкции, они могут быть как плоскими, так и объемными [15, 23, 29-31]. Примеры плоских спиральных антенн показаны на рис. 14.

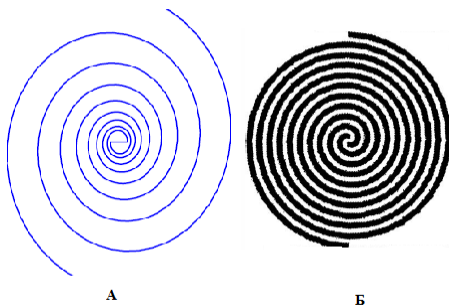


Рис. 14. Равноугольная логарифмическая спираль (а), архимедова спираль (б)

Индуктивная нагрузка за счет введения мендровой, синусоидальной или зигзаговой линии спирали вместо сплошной линии позволяет дополнительно улучшить антенну без введения дополнительных чипов или других элементов [23, 29]. На рис. 15 показан внешний вид спирали зигзагообразной линии.

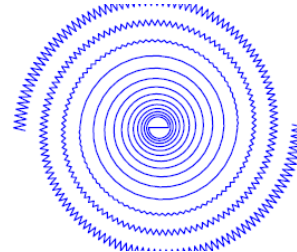


Рис. 15. Зигзагообразная линия спирали

Объемные спиральные антенны позволяют выполнить антенну в минимальном объеме. Наиболее распространенная форма конструкции таких антенн (рис. 16) – расположение токопроводящих элементов на сфере в виде спирали [23, 29-32].

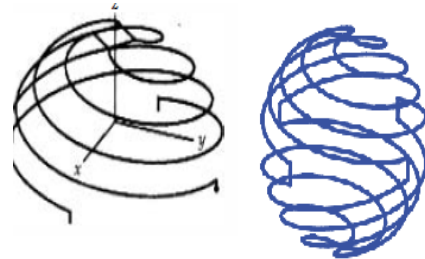


Рис. 16. Расположение токопроводящих элементов на сфере

В [11-13, 15, 32] описана антенна, работающая на частотах 1.7-1.78 ГГц размером нескольких сантиметров. На рис. 17 показан внешний вид антенны, а также значения КСВ, полученные в результате компьютерного моделирования антенны и измеренные на макете [15, 32]. Особенности численного моделирования таких антенн описаны в [31].

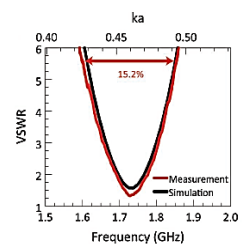
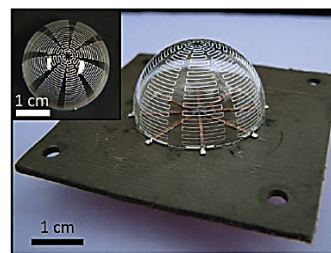


Рис. 17. Внешний вид антенны (а), КСВ (б)

Электрически малые антенны могут быть и сверхширокополосными. Различные варианты конструкции таких антенн описаны в [23], а в [31] описаны некоторые особенности при моделировании таких антенн. На рис. 18 показан внешний вид одной из таких антенн и ее КСВ [31].

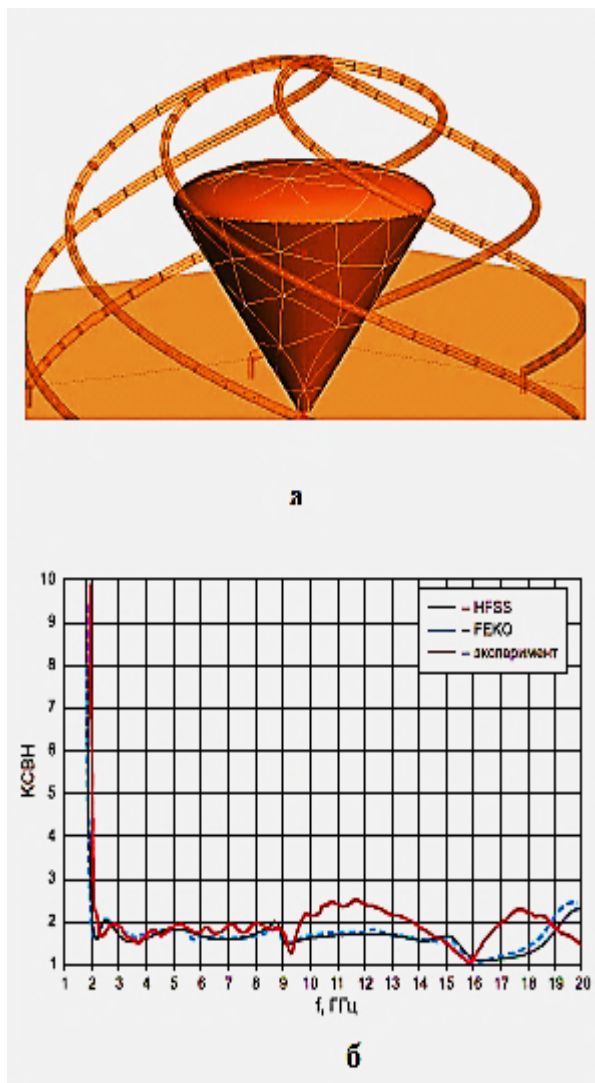


Рис. 18. Внешний вид антенны (а), ее КСВ (б)

В работе [33] проведены исследования характеристик электрически малых антенн, возбужденных различными модами, а также получены математические выражения для оценки этих характеристик. Различные формы протекания токов создают разные моды [22], при этом значения добротности будут отличаться. На рис. 19 показаны различные моды и полученные для каждой из них выражения для расчета добротности.

	Q_{tot}
 TM_{10}	$\frac{3/2 + 12(ka)^2}{(ka)^3 + \left(\frac{5}{8}\right)(k^2\delta_s a)}$
 TE_{10}	$\frac{3 + 3(ka)^2}{(ka)^3 + \frac{5\delta_s}{2a}}$
 TE_{20}	$\frac{45 + 15(ka)^2}{(ka)^5 + \frac{117\delta_s}{2a}}$
 $TM_{10}:TE_{10}$	$\frac{1 + 11(ka)^2/10}{(ka)^3 + \frac{5\delta_s}{6a}}$
 $TM_{10}:TE_{20}$	$\frac{3/2 + 97(ka)^2/140}{(ka)^3 + \frac{39\delta_s}{20a}}$

Рис. 19. Выражения для расчета добротности для каждой из мод возбуждения

Заключение

На основании выполненного аналитического обзора перспективных подходов к построению электрически малых антенн можно сформулировать следующие выводы.

1. Для создания электрически малых антенн, обладающих повышенной эффективностью, перспективно использовать антенны вибраторного типа с проводниками спиралевидной формы.

2. Электрически симметричные антенны позволяют снизить чувствительность антенного устройства к характеристикам подстилающей поверхности, которые необходимо учитывать для вычисления входного сопротивления антенны, ее КПД и диаграммы направленности.

3. При проектировании несимметричных антенн необходимо учитывать свойства подстилающей поверхности – металлической сетки и окружающей земной поверхности.

Литература

1. Wheeler H.A. Fundamental Limitations of Small Antennas // Proc. I.R.E. 1947. Vol. 35. P. 1479–1484.
2. Wheeler H.A. A helical antenna for circular polarization // Proc. I.R.E. 1947. Vol. 35. P. 1484–1488.
3. Chu L.J. Physical limitations of omni-directional antennas // J. Appl. Phys. 1948. Vol. 19. P. 1163–1175.
4. Harrington R.F. Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency // J. Res. Nat. Bur. Stand. 1960. Vol. 64D. № 1. P. 1–12.
5. Collin R.E., Rothschild S. Evaluation of antenna Q // IEEE Trans. on Antennas and Propag. 1964. Vol. 12. № 1. P. 23–27.

6. Fante R.L. Quality factor of general ideal antennas // IEEE Trans. On Antennas and Propag. 1969. Vol. 17. № 2. P. 151–155.
7. McLean J.S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas // IEEE Trans. on Antennas and Propag. 1996. Vol. 44. № 5. P. 672–675.
8. Беличенко В.П., Запасной А.С. Электрически малые антенны: проблемы, сомнения, новые результаты // Доклады ТУСУРа. 2008. № 2 (24). Ч. 1. С. 186–189.
9. Grimes D.M., Grimes C.A. Radiation Q of dipole-generated fields // Radio Science. 1999. Vol. 34. № 2. P. 281–296.
10. Grimes D.M., Grime C.A. Minimum Q of electrically small antennas. A critical review // Microwave Opt. Tech. Lett. 2001. Vol. 28. № 2. P. 172–177.
11. Чирков О.Н., Ромащенко М.А., Чураков П.П. Усовершенствованный метод оценки канала с итерационным подавлением помех для многопользовательских систем MIMO-OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 150–155.
12. Чирков О.Н., Ромащенко М.А., Панычев С.Н. Оптимальные алгоритмы совместной оценки канала радиосвязи и смещения частоты при многолучевом распространении сигнала // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 156–162.
13. Чирков О.Н. Эффективный алгоритм динамического распространения пилот-сигналов для оценки канала радиосвязи в многоантенных системах MIMO с ортогональным частотным уплотнением OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 163–168.
14. Experimental validation of performance limits and design guidelines for small antennas/ Sievenpiper, D. Dawson, M. Jacob, T. Kanar, S. Kim, J. Long, and R. Quarfoth // IEEE Trans. On Antennas Propag. 2012. Vol. 60. № 1. P. 8–19.
15. Robert C. Hansen, Robert E. Collin. Small Antenna Handbook // Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2011. 346 p.
16. Ignatenko M., Filipovic D. S. On the Design of Vehicular Electrically Small Antennas for NVIS Communications // IEEE Trans. On Antennas Propag. 2016. Vol. 64. № 6. P. 2136–2145.
17. Austin B.A., Boswell A. Loss Mechanisms in the Electrically Small Loop Antenna // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2014. Vol. 56. №4. P. 142–147.
18. Vogler L.E., Noble J. L. Curves of Input Impedance Change Due to Ground for Dipole Antennas: monograph. National Bureau of Standards Monograph 72, 1964. 47 p.
19. Best S.R. Optimizing the Receiving Properties of Electrically Small HF Antennas // URSI Radio Science Bulletin. 2016. Vol. 2016. № 359. P. 13–29.
20. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. 2010. № 3–4. С. 44–60.
21. Erentok A., Ziolkowski R.W. Metamaterial-Inspired Efficient Electrically Small Antennas // IEEE Trans. On Antennas Propag. 2008. Vol. 56. № 3. P. 691–707.
22. Christophe Caloz, Tatsuo Itoh Metamaterial-Inspired Efficient Electrically Small Antennas / Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2005. 376 p.
23. Volakis J., Chen CC., Fujimoto K. Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications. McGraw-Hill. 2010. 448 p.
24. A small and bandwidth-extended dipole antenna with non-periodic left-handed transmission line loading / W.P. Cao, L. Shafai, B.Z. Wang, S.M. Li, B.B. Li // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2014. Vol. 13. P. 1019–1022.
25. Ziolkowski R.W., Erentok A. At and below the Chu limit: passive and active broad bandwidth metamaterial-based electrically small antennas // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2007. Vol. 1. № 1. P. 116–128.
26. Efficient Radiation by Electrically Small Antennas made of Coupled Split-ring Resonators / L. Peng, P. Chen, A. Wu, G. Wang // Scientific Reports. 2016. № 6.
27. Shahpari M., Thiel D.V., Lewis A. An Investigation Into the Gustafsson Limit for Small Planar Antennas Using Optimization // IEEE Trans. On Antennas Propag. 2014. Vol. 52. № 2. P. 950–955.
28. Meneses R., Linares y Miranda R., Leyva Hernández R. Spiral Slotted Microstrip Antenna Design for 700 MHz Band Application // International Journal of Antennas and Propagation. 2016. Vol. 2016. P. 1–7.
29. Kramer B.A. Size reduction of an uwb low-profile spiral antenna: dissertation, presented in partial fulfillment of the requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University. 2007. 220 p.
30. Gustafsson M., Tayli D., Cismasu M. Physical Bounds and Optimal Currents on Antennas // IEEE Trans. On Antennas Propag. 2012. Vol. 60. № 6. P. 2672–2681.
31. Литун В. Разработка антенн малых электрических размеров с проволочными элементами конструкции // Компоненты и технологии. 2016. № 11. С. 118–122.
32. Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces / J.J. Adams, E.B. Duoss, T.F. Malkowski, M.J. Motala, B.Y. Ralph // Advanced Materials. 2011. № 23(11). P. 1335–1340.
33. Pfeiffer C. Fundamental Efficiency Limits for Small Metallic Antennas // IEEE Trans. On Antennas Propag. 2017. Vol. 65. № 4. P. 1642–1650.

Поступила 11.11.2019; принята к публикации 10.12.2019

Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: pasternakyg@mail.ru

Рогозин Евгений Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: evgenirogozin@yandex.ru

Рогозин Руслан Евгеньевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Сиваш Михаил Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: sivmikha@yandex.ru

ANALYSIS OF PERSPECTIVE APPROACHES TO THE CREATION OF ELECTRICALLY SMALL ANTENNAS WITH EFFICIENCY APPROACHING THE DEFINED IN ACCORDANCE WITH THE CHU-HARRINGTON-LEE-CRITERIUM

Yu.G. Pasternak, E.A. Rogozin, R.E. Rogozin, S.M. Fyedorov, M.A. Sivash

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: based on an analysis of open scientific and technical literature, an analysis of modern approaches to the creation of electrically small antennas was carried out. The most important characteristics that determine the operating frequency band of the antenna and its efficiency are described. The results of studying the quality factor of electrically small antennas depending on the type of excited modes are presented, as well as the mathematical expressions for electrically small antennas for evaluating the quality factor. The methods of accounting for losses in the electrical characteristics of antennas are considered. An example of the using electrically small antennas from half a loop (and similar structures) for installation on various military equipment is presented, as well as graphical dependencies characterizing the influence of the size of the antennas on the number of half rings. The paper considers the use of metamaterials: use as a shell to compensate for high reactivity, implementation of strip antennas of various designs, the use of broken ring resonators, the creation of an electrically small dipole antenna. Various methods for reducing the size of dipole antennas are also described: the implementation of a vibrator with a different shape of the shoulders (for example, tree-like). Various designs of spiral antennas are presented: flat and three-dimensional, as well as some ways to improve them

Key words: electrically small antennas, quality factor, efficiency, bandwidth

References

1. Wheeler H.A. "Fundamental limitations of small antennas", *Proc. I.R.E.*, 1947, vol. 35, pp. 1479–1484.
2. Wheeler H. A. "A helical antenna for circular polarization", *Proc. I.R.E.*, 1947, vol. 35, pp. 1484–1488.
3. Chu L.J. "Physical limitations of omnidirectional antennas", *J. Appl. Phys.*, 1948, vol. 19, pp. 1163–1175.
4. Harrington R.F. "Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency", *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1960, vol. 64D, no. 1, pp. 1–12.
5. Collin R.E., Rothschild S. "Evaluation of antenna Q", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, 1964, vol. 12, no. 1, pp. 23–27.
6. Fante R.L. "Quality factor of general ideal antennas", *IEEE Trans. On Antennas and Propag.*, 1969, vol. 17, no. 2, pp. 151–155.
7. McLean J.S. "A reexamination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, 1996, vol. 44, no. 5, pp. 672–675.
8. Belichenko V.P., Zapasnoy A.S. "Electrically small antennas: problems, doubts, new results", *TUSUR's Data*, 2008, no. 2 (24), part 1, pp. 186–189.
9. Grimes D.M., Grime C.A. "Minimum Q of electrically small antennas. A critical review", *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 2001, vol. 28, no. 2, pp. 172–177.
10. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Churakov P.P. "Improved method of channel estimation with iterative noise suppression for multi-user MIMO-OFDM systems", *Radio Engineering*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 150–155.
11. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Panychev S.N. "Optimal algorithms of joint estimation of radio communication channel and frequency shift at multipath signal distribution", *Radio Engineering*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 156–162.
12. Chirkov O.N. "Effective algorithm of dynamic propagation of pilot signals for estimation of radio communication capacity in multi-antenna MIMO systems with orthogonal frequency compaction OFDM", *Radio Engineering*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 163–168.
13. Sievenpiper, Dawson D., Jacob M., Kanar T., Kim S., Long J., Quarfoth R. "Experimental validation of performance limits and design guidelines for small antennas", *IEEE Trans. On Antennas Propag.*, 2012, vol. 60, no. 1, pp. 8–19.
14. Hansen R.C., Collin R.E. "Small antenna handbook", *Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey*, 2011, 346 p.
15. Ignatenko M., Filipovic D.S. "On the design of vehicular electrically small antennas for NVIS communications", *IEEE Trans. On Antennas Propag.*, 2016, vol. 64, no. 6, pp. 2136–2145.
16. Austin B.A., Boswell A., Perks M. "Loss mechanisms in the electrically small loop antenna", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2014, vol. 56, no. 4, pp. 142–147.
17. Vogler L.E., Noble J.L. "Curves of input impedance change due to ground for dipole antennas", *monograph: National Bureau of Standards Monograph 72*, 1964, 47 p.
18. Best S.R. "Optimizing the receiving properties of electrically small HF antennas", *URSI Radio Science Bulletin*, 2016, vol. 2016, no. 35, pp. 13–29.
19. Slyusar V. "Metamaterials in the antenna equipment: basic principles and results", *The First Mile (Pervaya milya)*, 2010, no. 3–4, pp. 44–60.
20. Erentok A., Ziolkowski R.W. "Metamaterial-inspired efficient electrically small antennas", *IEEE Trans. On Antennas Propag.*, 2008, vol. 56, no. 3, pp. 691–707.

21. Caloz C., Itoh T. "Metamaterial-inspired efficient electrically small antennas", *Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey*, 2005, 376 p.
22. Volakis J., Chen C.C., Fujimoto K. "Small antennas: miniaturization techniques & applications", *McGraw-Hill*, 2010, 448 p.
23. Cao W.P., Shafai L., Wang B.Z., Li S.M., Li B.B. "A small and bandwidth-extended dipole antenna with non-periodic left-handed transmission line loading", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, vol.13, pp. 1019-1022.
24. Ziolkowski R.W., Erentok A. "At and below the Chu limit: passive and active broad bandwidth metamaterial-based electrically small antennas", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2007, vol.1, no. 1, pp.116-128.
25. Peng L., Chen, P., Wu A., Wang G. "Efficient radiation by electrically small antennas made of coupled split-ring resonators", *Scientific Reports*, 2016, no. 6.
26. Shahpari M., Thiel D. V., Lewis A. "An Investigation into the gustafsson limit for small planar antennas using optimization", *IEEE Trans. On Antennas Propag.*, 2014, vol. 52, no. 2, pp.950–955.
27. Meneses R., Linares y Miranda R., Leyva Hernández R. "Spiral slotted microstrip antenna design for 700 MHz band application", *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, vol. 2016, pp.1-7.
28. Kramer B.A. "Size reduction of an uwb low-profile spiral antenna", *dissertation, presented in partial fulfillment of the requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University*, 2007, 220p.
29. Gustafsson M., Tayli D., Cismasu M. "Physical bounds and optimal currents on antennas", *IEEE Trans. On Antennas Propag.*, 2012, vol. 60, no. 6, pp. 2672-2681.
30. Litun V. "Development of antennas of small electrical sizes with wire elements of construction", *Components and technologies (Komponenty i tekhnologii)*, 2016, no. 11, pp.118-122.
31. Adams J.J., Duoss E. B., Malkowski T.F., Motala M.J., Ralph B.Y "Conformal printing of electrically small antennas on three-dimensional surfaces", *Advanced Materials*, 2011, no. 23(11), pp.1335-1340.
32. Pfeiffer C. "Fundamental efficiency limits for small metallic antennas", *IEEE Trans. On Antennas Propag.*, 2017, vol. 65, no. 4, pp. 1642-1650.

Submitted 11.11.2019; revised 10.12.2019

Information about the authors

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru
Evgeniy A. Rogozin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: evgenirogozin@yandex.ru
Ruslan E. Rogozin, Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru
Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: fedorov_sm@mail.ru;
Mikhail A. Sivash, Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sivmikha@yandex.ru

МЕТОДИКА МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ РЭС НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.С. Потапов, Н.В. Ципина, Ю.В. Худяков, Т.Д. Ижокина, А.О. Кузнецова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: разработана методика междисциплинарного инженерного анализа конструкций РЭС, изготовленных из программируемых материалов. Благодаря данной методике возможно усовершенствование и упрощение процесса разработки "умных" материалов и развитие самой технологии программируемых материалов. Разработанная методика включает в себя аналитический расчет, численное моделирование в САПР, а также испытание на экспериментальном стенде. В качестве объекта для моделирования был использован слоистый композитный программируемый материал, включающий в свой состав главный действующий элемент, электрореологическую жидкость, меняющую свойства под воздействием внешнего электрического поля. Однако данная методика с небольшими доработками применима и для магнитореологических материалов. По результатам исследования были установлены свойства нового материала, определено влияние его геометрических параметров, состава, величины внешнего электрического поля на его жесткость, коэффициент демпфирования и возможность противостоять резонансным явлениям. Данная область проектирования является чрезвычайно перспективной в силу своей низкой стоимости, высокой скорости и простоты реализации, а также широко- и легкодоступности. Разработанная методика позволит еще лучше отточить и усовершенствовать технологический процесс, а также изучить свойства разрабатываемых материалов

Ключевые слова: междисциплинарный инженерный анализ, электрореологические и магнитореологические материалы, алгоритм междисциплинарного анализа

Введение

В последние годы пользуется популярностью технология 3D-печати. Благодаря этой технологии изготавливаются прототипы и конечные изделия. Инновационным прорывом стало возникновение новой ветки развития - четырехмерной печати. Это значит, что конструкция, изготовленная по подобной технологии, может менять свои характеристики или даже форму с течением времени под воздействием определенных факторов среды: нагрева или охлаждения, механических воздействий, контакта со светом или водой. Для усовершенствования процесса разработки, отладки [1] и оптимизации технологии в целом предлагается методика, позволяющая исследовать характеристики некоторых видов 4D-материалов.

Ключевыми факторами, воздействующими на конструкции РЭС, являются электромагнитные волны, тепловые и механические нагрузки. Среди источников электромагнитных волн основными являются трансформаторы, радиопередающие устройства, некоторые радиоэлектронные компоненты, различные источники питания и др. Источниками нагрева чаще всего являются мощные полупроводниковые устройства, а также внешние источники

теплового излучения. Механические нагрузки, действующие на РЭА, чаще всего представляют собой статические или динамические воздействия, вибрации, удары и иногда их комбинацию.

Известно, что свойства материалов и конструкций могут меняться в зависимости от свойств окружающей среды и различных внешних факторов. Помимо этого, факторы одной физической природы могут вызывать появление сил и явлений другой физической природы. В случае с волнами это может быть нагрев проводников за счет омических потерь или возникновение силы Лоренца или Ампера, которые, в свою очередь, механически воздействуют на проводники или частицы, или даже на целые органы РЭА. Современные средства автоматизированного проектирования позволяют проводить исследования подобных явлений.

Методика междисциплинарного многовариантного инженерного анализа механических характеристик конструкций РЭС

Наибольшая сложность при моделировании и составлении методики состоит в чрезвычайно высокой трудоемкости моделирования поведения мелкодисперсных растворов и суспензий, коими и являются электро- и магнитореологические жидкости. Это связано с огром-

ным количеством необходимых вычислений, ведь для каждой из микроскопических частиц, находящихся в растворе, потребуется создать конечно-элементную сетку, а затем рассчитать их взаимодействие с электрическим или магнитным полем, взаимодействие с жидкостью, а также взаимодействие друг с другом, учет броуновского движения, вязкости жидкости и прочие факторы. Столь трудоемкая задача не предполагает непосредственного решения на данном этапе развития вычислительной техники и прикладного программного обеспечения, поэтому существуют методы, позволяющие с высокой точностью описать поведение таких сложных композитных материалов.

Традиционные методы решения этой задачи сводятся к замене физической модели жидкости на одну из математических моделей, симулирующих ее поведение. В ряду феноменологических моделей есть модели параметрические: модель Бинама, расширенная модель Бинама, трехэлементная модель, модель Бин-Макса, модель Боук-Вена, модифицированная модель Боук-Вена, нелинейная вязкоупругая модель, расширенная нелинейная вязкоупругая модель и другие. Среди непараметрических моделей действуют такие модели, как многочлены Чебышева и нейросетевые алгоритмы.

Например, в работе [2] исследователи при моделировании в САПР разделили магнито-реологическую жидкость на два связанных между собой элемента, один из них имеет плотность и вязкость, но не имеет модуля сдвига, в то время как другой имеет модуль сдвига, но не имеет плотности и вязкости. Корректность решения была подтверждена теоретическими и натуральными экспериментами.

В рамках этой статьи электрореологическая жидкость будет заменена вязкоупругой моделью, свойства которой (коэффициент демпфирования, предел текучести и др.) будут определяться первичным экспериментом, а затем моделироваться в САПР и результаты валидироваться конечным экспериментальным исследованием.

Методика междисциплинарного анализа любой конструкции начинается с постановки задачи. На этом этапе точно формулируются условия задачи, определяется конечная цель исследования, количество, характер и тип воздействий, которым подвергается исследуемая конструкция, определяется структура экспериментов и представление результатов [3].

После постановки задачи происходит сбор необходимой информации, такой как тип материалов, применяемых в анализируемой конструкции, и его свойства, массогабаритные параметры, детали структуры и формы. В данном случае именно характеристики программируемых материалов имеют наибольшее значение в исследовании, поэтому им уделяется большое количество внимания.

Выбираем метод решения задачи анализа: аналитический или численный. При решении аналитическим методом определяется приближенная математическая модель конструкции, а затем решается цепь математических задач, целью которых является определение искомым свойств модели: собственной частоты колебаний, жесткости, величины напряжений в теле, формы собственных колебаний. В ином случае, как и в случае невозможности аналитического решения задачи, осуществляется переход сразу к численному решению в САПР ANSYS.

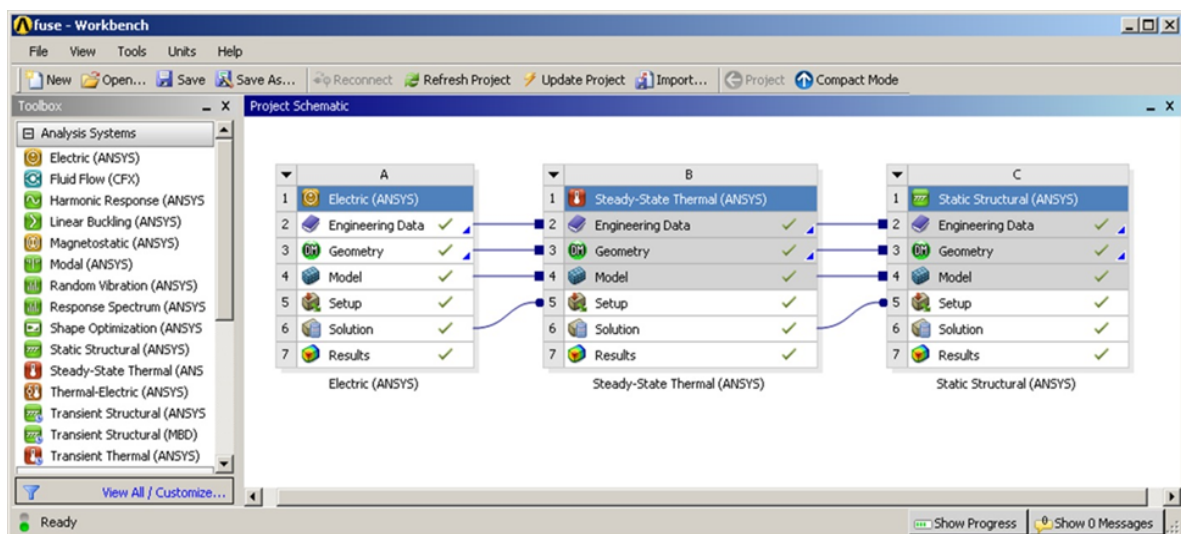


Рис. 1. Схема проекта в рабочем пространстве САПР ANSYS

Во-первых, определяются условия испытания на стенде, исходя из параметров конструкции.

Одна из сторон панели (рис. 2) закрепляется на вибростенде, который создает колебания определенной частоты.

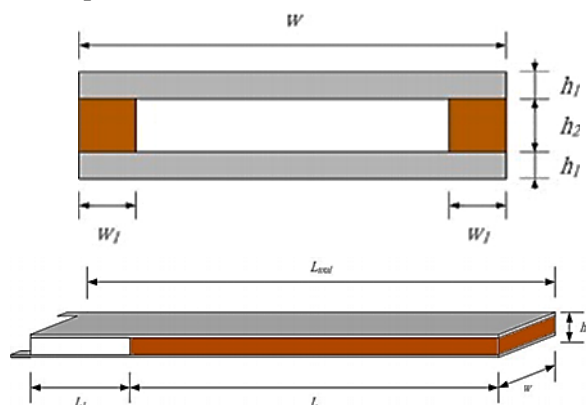


Рис. 2. Эскиз конструкции

Схема испытательной установки приведена на рис. 3. Лазерный дальномерный датчик, установленный сверху над конструкцией, и устройство измерения вихревых токов снизу определяют смещение пластины. Высоковольтный усилитель обеспечивает подачу требуемого напряжения на электроды слоистой панели, которые, в свою очередь, создают электрическое поле, требуемое для изменения жесткости конструкции [4]. Анализатор спектра обрабатывает получаемую с датчиков информа-

цию, в то время как стенд совершает колебания с частотой от 0 до 200 Гц. Затем величина приложенного электрического поля меняется с определенным шагом от 0 до 2 КВ/мм и замеры повторяются. Анализатор производит быстрое преобразование Фурье и строит спектр частотного отклика. Исходя из полученных результатов, при помощи параметрической оптимизации в САПР ANSYS определяется модуль сдвига материала. В соответствии с частотой 1-й моды многослойной панели, эквивалентный модуль сдвига может быть получен с помощью метода целевой оптимизации в ANSYS Workbench. При моделировании цель состоит в том, чтобы найти оптимальный модуль сдвига ERF, чтобы полученная при симуляции частота 1-й моды конструкции соответствовала фактическому значению, полученному в экспериментах. Следовательно, коэффициент демпфирования и модуль сдвига используются в модели ANSYS. Данные параметры могут быть также описаны внутрисистемной переменной, зависимой от энергии электрического поля. После этого на основе полученных данных проводится полное компьютерное моделирование, в котором определяются гармоника собственных колебаний конструкции и их формы [5]. Междисциплинарный анализ в САПР начинается с создания трехмерной модели исследуемой конструкции (рис. 4).

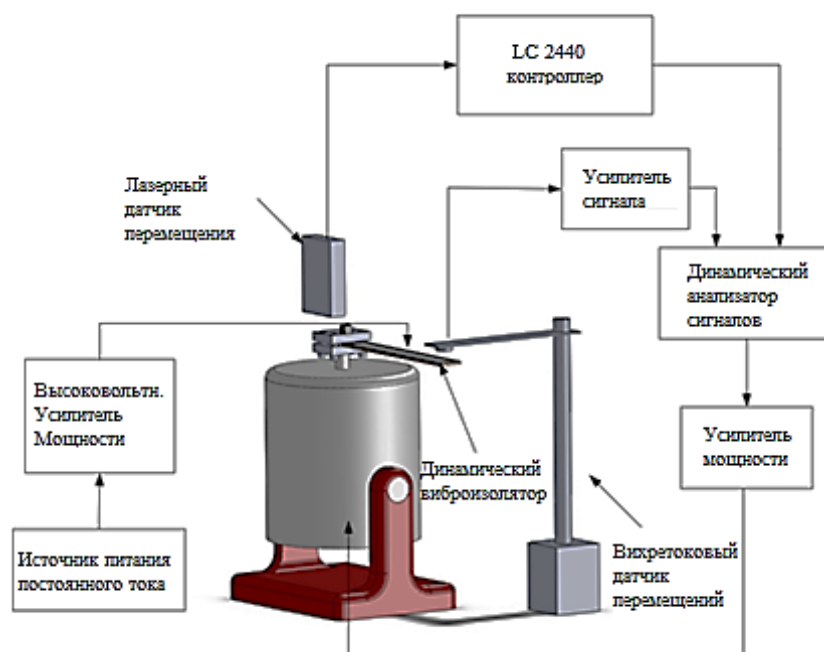


Рис. 3. Экспериментальная установка

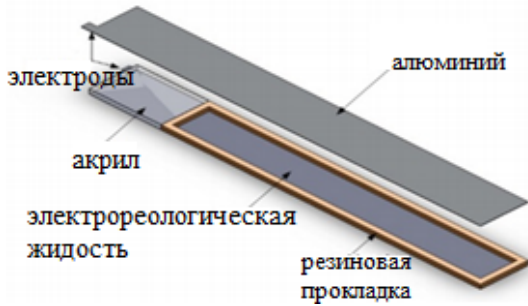


Рис. 4. Трехмерная модель слоистого материала

Модель может быть создана как в стороннем САПР, так и в самом ANSYS. Далее в рабочем пространстве размещаются необходимые модули, например модули электростатического или электродинамического анализа, модуль анализа потока, модуль теплового стационарного анализа и модуль статического механического анализа, то есть учитывается комплексный подход [6]. Модель импортируется в первый модуль, где ей задаются соответствующие материалы и их свойства, опре-

деляются настройки самого модуля, устанавливаются нагрузки, ограничения и искомые величины и затем происходит создание конечно-элементной сетки и последующие постановка и решение задачи. Решение, а при необходимости геометрия и другие данные, переносятся в последующий расчетный модуль путем установления визуальных связей между блоками, как показано на рис. 1. Результаты решения могут быть перенесены в следующий модуль или возвращены в предыдущий для уточнения условий и перерешения.

Если эти результаты не удовлетворяют требованиям, то происходит оптимизация конструкции, преследующая устранение имеющихся недостатков. После этого вновь производится инженерный анализ. Если же результаты являются удовлетворяющими, то исследование переходит в область экспериментального подтверждения. На рис. 5 представлен алгоритм междисциплинарного анализа.

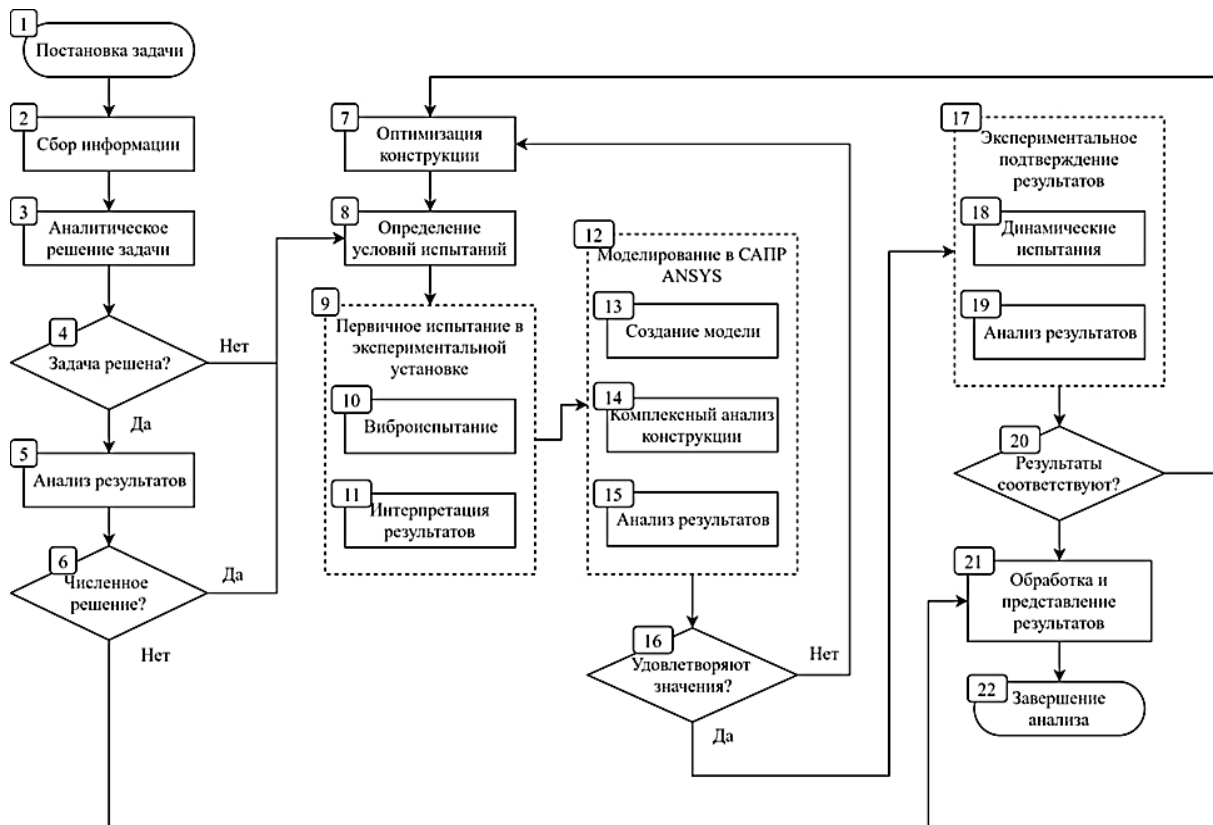


Рис. 5. Алгоритм междисциплинарного анализа

В ходе подтверждающего исследования пластина закрепляется на платформе экспериментальной установки. Воздействие определенной частоты передается на нее с помощью

специального молоточкового механизма, а реакция измеряется бесконтактным датчиком вихревых токов. Оба сигнала, управляющий и управляемый, формируются динамическим

спектроанализатором, работающим в паре с компьютером. При этом для подтверждения результатов анализа молоточковый механизм и датчик вихревых точек могут располагаться в разных точках мнимой сетки, которой разделена панель.

После этого, полученные в результате эксперимента формы, мод пластины сравниваются с полученными ранее пластинами. В случае совпадения исследование продолжается, в ином - происходит оптимизация конструкции и исследование повторяется. Геометрия и другие данные переносятся в последующий расчетный модуль, путем установления визуальных связей между блоками. Далее совершается аналогичный предыдущему случаю набор действий. Результаты решения переносятся в следующий модуль или возвращаются в предыдущий. После решения задачи в САПР осуществляется анализ и обработка результатов исследований. В случае, если ранее проводился аналитический анализ, также производится их сравнение с целью установления адекватности полученных результатов.

Для измерения частотного отклика при различных значениях подводимого электрического тока и электрического поля внутри панели используют специальную установку. Электромагнитный возбудитель колебаний используется для создания воздействий четко определенной частоты. Во время измерения произвольный возбуждающий сигнал генерируется анализатором спектра, затем усиливается и подается на источник колебаний. Один датчик вихревых токов измеряет частоту возбуждаемых колебаний, а второй частоту колебаний исследуемой пластины. Таким образом, можно установить, как величина электрического поля, воздействующего на электрореологическую жидкость, влияет на такие динамические характеристики материала, как жесткость, коэффициент демпфирования и величину собственной частоты колебаний. После получения результатов проводится их окончательный анализ и методика завершается. Также возможно использование контроллера на нечеткой логике, позволяющего регулировать электрическое поле в зависимости от возбуждающей частоты и идентифицировать возникновение резонанса. Нечеткий контроллер типа 2 имеет два входа и один выход. Первый вход - это частота колебаний, которая получается путем быстрого преобразования Фурье (БПФ) измеренных сигналов колебаний. Второй вход - среднеквадратичное значение (RMS) пере-

мещения свободного конца пластины. Среднеквадратичное значение смещений и частота вибрации возвращаются в нечеткий контроллер, который выдает требуемое выходное напряжение на высоковольтный усилитель мощности. Следовательно, мы обсудим, как спроектировать нечеткий контроллер типа 2, чтобы установить отображение ввода-вывода между сигналом вибрации и требуемым электрическим полем материала ERF.

Нечеткие правила полуактивного контроля обычно получают с помощью экспертной базы данных или соотношения между входом и выходом из результатов эксперимента. Чтобы установить базу правил нечеткого контроллера на разных частотах, измеряется вибрационный отклик структуры с помощью ERF ATVA с различным приложенным электрическим полем на разных частотах; затем, согласно экспериментальным результатам, регистрируется оптимальное электрическое поле на различной частоте для создания экспертной базы данных нечетких правил.

Сигнал усиливается для возбуждения электромагнитного вибратора, который, в свою очередь, создает стимулирующую вибрацию для конструкции. Следовательно, электрическое поле пластинчатого материала настроено на разные уровни 0–2 (кВ/мм) для проведения вибрационных экспериментов; вибрационное смещение конструкции измеряется вихретоковыми датчиками смещения и регистрируется NI CRIO 9074 одновременно. Для внешней вибрации, создаваемой вибростендом с синусоидальными сигналами различной амплитуды при 8–80 Гц, в таблицах записываются частотные характеристики этой интеллектуальной структуры.

Электрическое поле заставляет материал менять его собственные механические свойства, играя роль некоего триггера [7]. В дальнейшем также возможно учитывать вклад различных температурных воздействий, влияющих или возникающих в сложных переходных процессах, неизбежно протекающих в программируемых материалах.

Реализация методики междисциплинарного инженерного анализа

В испытаниях на экспериментальных стендах использовалась модифицированная слоистая конструкция (рис. 6).

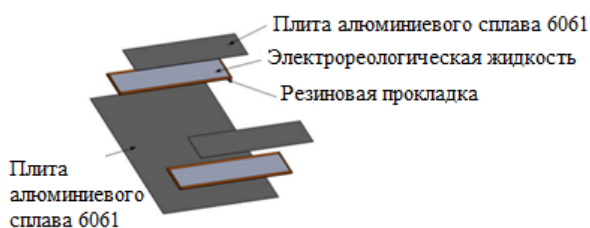


Рис. 6. Модифицированная модель

По результатам первичных исследований на экспериментальной установке были получены спектры колебаний панели при различных значениях напряженности электрического поля, приложенного к электрореологической жидкости (рис. 7). Сначала испытание проводится с изменением частоты во всем диапазоне при нулевой напряженности электрического

поля, затем напряженность увеличивается на определенную величину и замер повторяется.

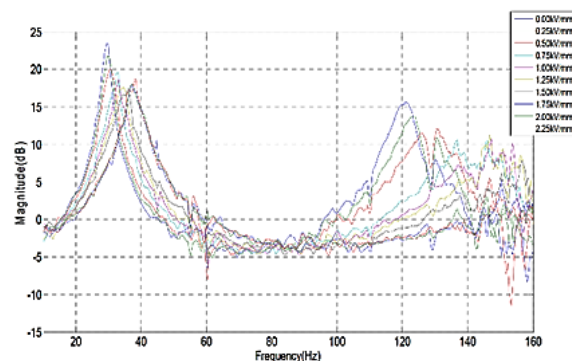


Рис. 7. Спектры колебаний панели

Результаты расчета коэффициента демпфирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Таблица результатов эксперимента

E (kV/mm)	F (Hz)	Amplitude (dB)	Damping Ratio (ζ)
0	29.5	23.473	0.0363
0.25	29.75	21.777	0.0432
0.5	30.5	20.127	0.0573
0.75	32.75	19.658	0.0574
1	33	18.705	0.0587
1.25	34.5	17.700	0.0589
1.5	36	17.457	0.0593
1.75	37	17.961	0.0529
2	37.25	18.075	0.0560
2.25	38.25	18.774	0.0512

Исходя из полученных результатов, определяются динамические характеристики "умного" материала, а затем проводится частотный анализ модели конструкции в САПР ANSYS. В результате были получены частоты основных гармоник и в том числе формы соответствующих мод (рис. 8).

Результаты анализа чувствительности к геометрическим размерам пластины при изменяющемся электрическом поле представлены в табл. 2.

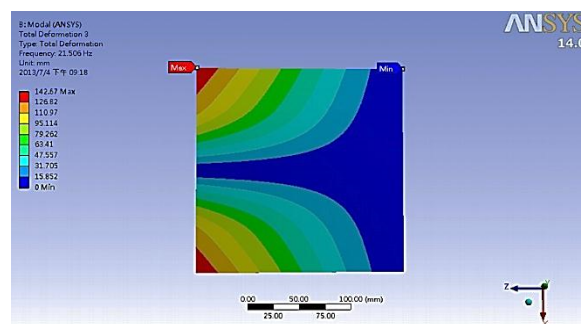


Рис. 9. Вторая мода

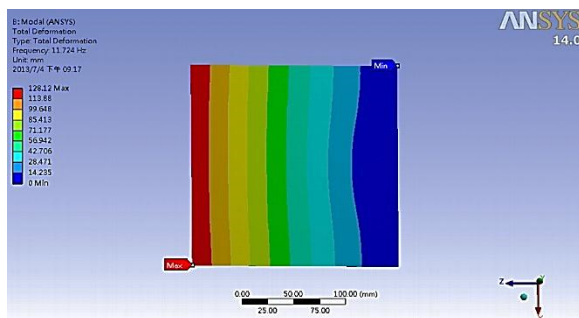


Рис. 8. Первая мода

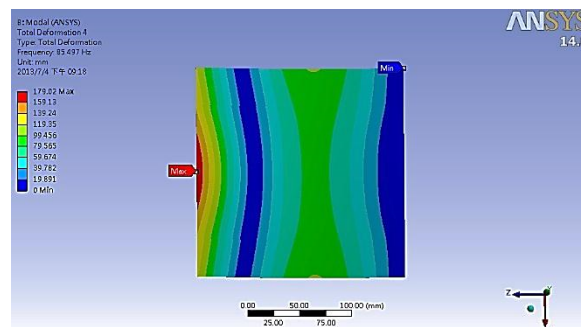


Рис. 10. Третья мода

Таблица 2

Результаты анализа чувствительности

W (mm)	1st Mode Variation (Hz)	2nd Mode Variation (Hz)	3rd Mode Variation (Hz)
20	1.362	1.811	10.069
22	1.331	1.724	10.756
24	1.406	1.939	14.912
26	1.378	1.862	16.391
28	1.392	1.825	17.613
30	1.374	1.86	18.352
32	1.357	1.963	18.790
34	1.399	1.941	18.980
36	1.361	2.001	19.157

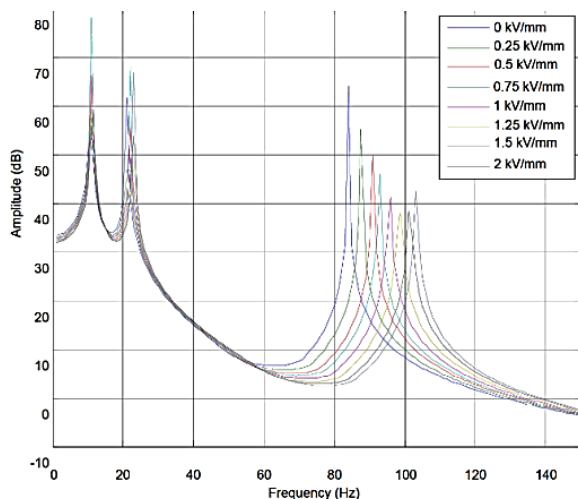


Рис. 11. Частотный спектр

На рис. 11 представлен частотный спектр колебаний панели, рассчитанный в САПР ANSYS.

Следующий эксперимент проводился для подтверждения результатов моделирования. С помощью специального механизма, описанного ранее, снимается форма колебаний реальной пластины в области резонансов и сравнивается с формами, полученными при численном моделировании.

Как видно, результаты моделирования и реального исследования имеют высокую идентичность, хоть и не совпадают идеально.

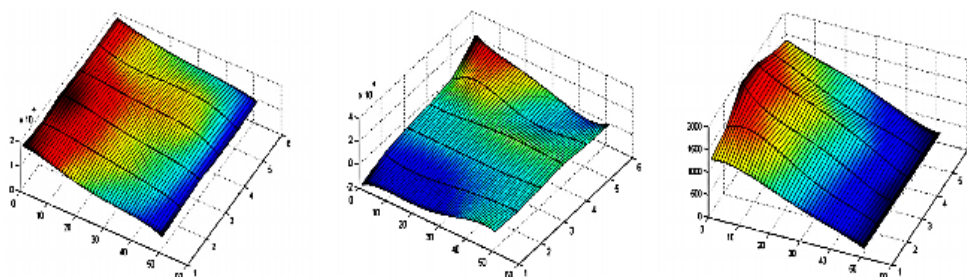


Рис. 12. Экспериментальные данные

В табл. 3 приведены экспериментальные результаты для первых трех мод этой структуры при применении различных внешних электрических полей (от 0 кВ/мм до 2 кВ / мм).

В этой таблице меньшее среднеквадратичное значение датчика перемещения означает, что материал обладает лучшей способностью поглощать вибрацию. В том же столбце номер типа жирным шрифтом показывает, что конструкция имеет меньшую вибрацию при той же внешней возбуждающей частоте. Для первой моды вибрации с частотным диапазоном 8–17 Гц экспериментальные результаты показывают, что материал обладает лучшими характеристиками при большем внешнем

электрическом поле. Эти экспериментальные результаты показывают, что панель обладает лучшей способностью поглощать вибрацию, если ее коэффициент вязкости больше для частоты в первом режиме вибрации. Однако для второго режима вибрации оптимальное внешнее электрическое поле отличается от первого режима. За исключением вибрации на частоте 21 Гц, ATVA имеет лучшую способность поглощать вибрацию с меньшим электрическим полем на частотах 19, 23 и 25 Гц. При вибрации на частоте 21 Гц ATVA с электрическим полем $E = 1$ кВ / мм обладает лучшей способностью поглощать вибрацию, чем другие. По итогам исследования было установлено, что

при увеличении приложенного электрического напряжения повышается частота резонанса, а амплитуда колебаний уменьшается, что

говорит об общем повышении жесткости конструкции. При этом очевидно, что процесс имеет нелинейный характер.

Таблица 3

Результаты заключительного эксперимента

E (kV/mm)	F (Hz)	Amplitude (dB)	Damping Ratio (ζ)
0	11.625	16.103	0.0218
0.5	11.875	10.142	0.0140
1	12	12.677	0.0205
1.5	12.375	15.809	0.0541
2	13.375	11.629	0.0329

E (kV/mm)	F (Hz)	Amplitude (dB)	Damping Ratio (ζ)
0	18.375	17.876	0.0156
0.5	18.125	14.201	0.0129
1	18.25	12.423	0.0212
1.5	18.5	14.365	0.0151
2	18.5	15.304	0.0119

E (kV/mm)	F (Hz)	Amplitude (dB)	Damping Ratio (ζ)
0	77	20.795	0.0083
0.5	77.625	19.547	0.0087
1	77.875	17.414	0.0108
1.5	78.125	18.382	0.0122
2	78.625	17.588	0.0119

По итогам исследования было установлено, что при увеличении приложенного электрического напряжения повышается частота резонанса, а амплитуда колебаний уменьшается, что говорит об общем повышении жесткости конструкции. При этом очевидно, что процесс имеет нелинейный характер [8].

Сигналы возбуждения на частотах от 8 до 75 Гц подаются на вибростенд, чтобы проверить предложенный полуактивный демпферный контроллер. Чтобы сравнить характеристики предлагаемого контроллера для различных режимов вибрации, были разработаны пять тематических исследований для выявления способности материала гасить вибрации. На рис. 13-16 сравниваются вибрационные отклики без внешнего контроллера с откликами предлагаемого контроллера на частоте 8, 10, 20 и 77 Гц, где контроллер на нечеткой включается в момент времени $t = 2,5$ с.

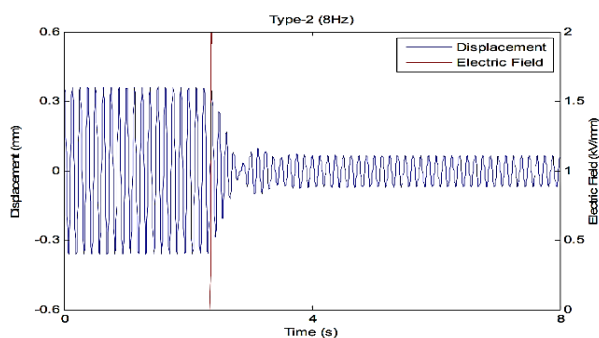


Рис. 13. Реакция на приложение электрического поля на частоте 8 Гц

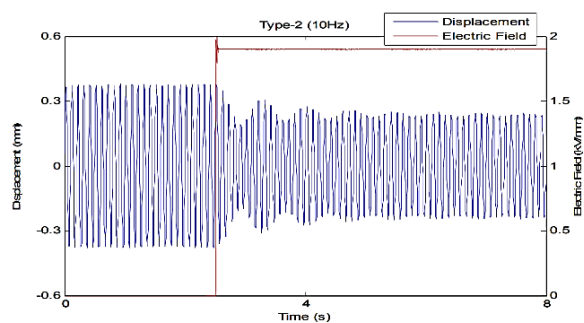


Рис. 14. Реакция на приложение электрического поля на частоте 10 Гц

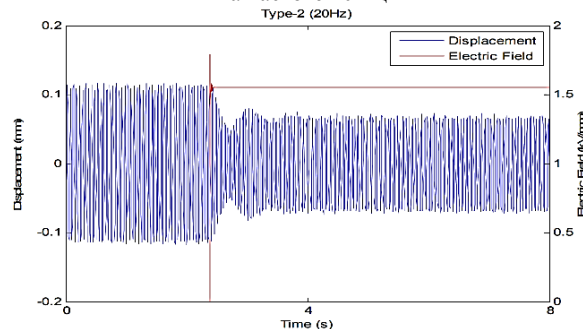


Рис. 15. Реакция на приложение электрического поля на частоте 20 Гц

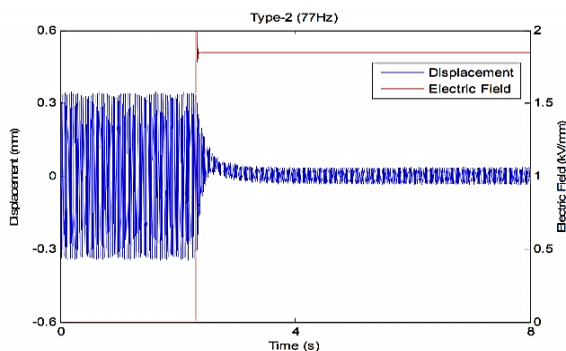


Рис. 16. Реакция на приложение электрического поля на частоте 77 Гц

Заключение

В результате исследований была описана разработка и апробирована методика междисциплинарного инженерного анализа конструкций РЭС, изготовленных на основе применения программируемых материалов. Разработанная методика включает в себя аналитический расчет, численное моделирование в САПР, а также испытание на экспериментальном стенде, которое является подтверждающим результаты предыдущих исследований.

В качестве объекта для моделирования был использован слоистый композитный программируемый материал, включающий в свой состав главный действующий элемент, электрореологическую жидкость, меняющую собственные свойства под воздействием внешнего электрического поля. Однако данная методика с небольшими доработками применима и для магнитореологических материалов.

По результатам исследования были установлены свойства нового материала, определено влияние его геометрических параметров, состава, величины внешнего электрического поля на его жесткость, коэффициент демпфирования и возможность противостоять резонансным явлениям.

В перспективе также возможно изучение влияния температурных нагрузок на свойства подобных материалов в рамках комплексного инженерного анализа.

Благодаря данной методике возможно усовершенствование и упрощение процесса разработки "умных" материалов и развитие самой технологии программируемых материалов.

Литература

1. Chih-Jer Lin. Vibration Control Design for a Plate Structure with Electrorheological ATVA Using Interval Type-2 Fuzzy System // *Applied Sciences*. 2017. №7.
2. ZHANG Zheng. A Method to Simulate the MR Fluid in ANSYS // *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*. 2011. №4.
3. Чирков О.Н., Астрединов Р.К. Многополосный преобразователь частоты OFDM // *Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж*, 2018. С. 120-124.
4. Влияние расположения TSV-отверстий и RDL-слоев на теплораспространение в 3D-DRAM/ Д.А. Хараджиди, К.Н. Багнюков, Н.В. Ципина, А.В. Муратов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019. Т. 15. № 4. С. 63-68.
5. Ципина Н.В., Хараджиди Д.А. Комплексное моделирование и оптимизация конструкций в процессе сквозного проектирования РЭС // *Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж*, 2016. С. 8-16.
6. Комплексное моделирование и оптимизация характеристик в процессе конструкторского проектирования радиоэлектронных средств/ О.Ю. Макаров, А.В. Турецкий, Н.В. Ципина, В.А. Шуваев // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2015. Т. 11. № 6. С. 100-104.
7. Совершенствование методологии планирования радиочастотного спектра на основе технологий математического моделирования: монография / С.Н. Яньшин, В.В. Лавлинский, С.А. Змеев, Е.А. Рогозин, И.А. Новикова, М.В. Питолин, Н.В. Ципина, О.Ю. Макаров. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017.
8. Верификация LDPC-кодов / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.С. Костюков, М.В. Хорошайлова, О.Н. Чирков // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2017. Т. 13. № 1. С. 74-77.

Поступила 24.10.2019; принята к публикации 10.12.2019

Информация об авторах

Потапов Степан Сергеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: stptpv@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3511-8223>

Ципина Наталья Викторовна - канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tcnv@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5688-355X>

Худяков Юрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: faddey52@mail.ru

Ижокина Татьяна Дмитриевна - студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tatyanaizhokina@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7905-3257>

Кузнецова Анастасия Олеговна – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kuznecova070703@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6743-6624>

METHOD OF INTERDISCIPLINARY ENGINEERING ANALYSIS OF ELECTRONICS STRUCTURES BASED ON PROGRAMMABLE MATERIALS

S.S. Potapov, N.V. Tsipina, Yu.V. Khudyakov, T.D. Izhokina, A.O. Kuznetsova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a methodology for interdisciplinary engineering analysis of electronic structures made of programmable materials was developed. Thanks to this technique, it is possible to improve and simplify the process of developing “smart” materials and to develop the technology of programmable materials itself. The developed technique includes analytical calculation, numerical simulation in CAD, as well as testing at an experimental bench. A layered composite programmable material was used as an object for modeling, which includes the main active element, an electrorheological fluid, which changes its own properties under the influence of an external electric field. However, this technique with small modifications is also applicable to magnetorheological materials. According to the results of the study, the properties of the new material were established, the influence of its geometrical parameters, composition, external electric field on its stiffness, damping coefficient and the ability to withstand resonance phenomena were determined. This design area is extremely promising due to its low cost, high speed and ease of implementation, as well as wide and easy availability. The developed methodology will make it possible to hone and improve the process even better, as well as better study the properties of the materials being developed

Key words: interdisciplinary engineering analysis, electrorheological and magnetorheological materials, interdisciplinary analysis algorithm

References

1. Chih-Jer Lin “Vibration control design for a plate structure with electrorheological ATVA using interval type-2 fuzzy system”, *Applied Sciences*, 2017, no. 7.
2. Zhang Zheng “A method to simulate the MR fluid in ANSYS”, *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2011, no. 4.
3. Chirkov O.N., Astredinov R.K. “Multiband converter of frequency of OFDM”, *Problems of Reliability Assurance and Quality of Devices and Systems. Interuniversity collection of scientific works (Problemy Obespecheniya Nadezhnosti i Kachestva Priborov, Ustroystv i Sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, 2018, pp. 120-124.
4. Harajidi D.A., Bagnyukov K.N., Tsipina N.V., Muratov A.V. “Influence of location of TSV-holes and RDL-layers on heat propagation in 3D-DRAM”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 63-68.
5. Tsipina N.V., Haradzhi D.A. “Complex modeling and optimization of designs in the course of through design of RES”, *Interuniversity Collection of Scientific Works: Problems of Reliability Assurance and Quality of Devices and Systems (Problemy Obespecheniya Nadezhnosti i Kachestva Priborov, Ustroystv i Sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, 2016, pp. 8-16.
6. Makarov O.Yu., Turetskiy A.V., Tsipina N.V., Shuvaev V.A. “Complex modeling and optimization of characteristics in the process of design projection of electronic means”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 100-104.
7. Yan'shin S.N., Lavlinskiy V.V., Zmeev S.A., Rogozin E.A., Novikova I.A., Pitolin M.V., Tsipina N.V., Makarov O.Yu. “Improvement of the methodology of planning of radio frequency spectrum based on the technologies of mathematical modeling” (“Sovershenstvovanie metodologii planirovaniya radiochastotnogo spektra na osnove tekhnologiy matematicheskogo modelirovaniya”), monography, Voronezh State Technical University, 2017.
8. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Kostikov A.S., Khoroshailova M.V., Chirkov O.N. “Verification of LDPC-codes”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 74-77.

Submitted 24.10.2019; revised 10.12.2019

Information about the authors

Stepan S. Potapov, Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: stptpv@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3511-8223>

Natal'ya V. Tsipina, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tcnv@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5688-355X>

Yuriy V. Khudyakov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: faddey52@mail.ru

Tat'yana D. Izhokina, Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tatyanaizhokina@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7905-3257>

Anastasiya O. Kuznetsova, Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kuzne-cova070703@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6743-6624>

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.6.016

УДК 53.072:621.791.4

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНОГО ОТЖИГА НА ТОПОГРАФИЮ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ И ПОВТОРНО–СТАТИЧЕСКУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ СПЛАВА ОТ4**А.Б. Булков¹, В.В. Пешков¹, А.Б. Коломенский², Д.И. Бокарев¹, Г.В. Селиванов¹**¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**²**ПАО «Воронежское акционерное самолётостроительное общество», г. Воронеж, Россия**

Аннотация: нагрев титана до высоких температур приводит к образованию на его поверхности оксидных и газонасыщенных слоев, при этом резко ухудшаются механические характеристики материала и в первую очередь пластичность. В качестве критерия охрупченности поверхностных слоев на титане предложено использовать вид их излома, образующийся при разрушении, например изгибом. Для изучения строения изломов изготавливали полированные образцы размером 30×10×3 мм из листового сплава ОТ4, подвергаемые отжигу в вакууме 2,6 Па при температурах 600 – 900 °С и затем разрушали изгибающим усилием. Толщину оксидных пленок оценивали по их интерференционной окрашенности, а глубину газонасыщенного слоя – замером микротвердости поверхности после регламентированного съема части поверхностного слоя химическим травлением. О влиянии оксидных и газонасыщенных слоев на механические свойства сплава ОТ4 судили по результатам испытаний образцов из листового проката толщиной 0,8 мм на повторно–статическое растяжение при коэффициенте асимметрии цикла $R=+0,1$, частоте 0,6–0,8 Гц и напряжении $\sigma_{max} \approx (0,6 \dots 0,8)\sigma_b$ на установке УММ–10. При изучении строения изломов можно выявить зону хрупкого разрушения, соответствующую распространению трещины в оксиде и охрупченной части газонасыщенного слоя, и зону квазивязкого разрушения, в которой присутствуют гребни отрыва, переходящие в ямочный рельеф, сформировавшийся при распространении трещины в части газонасыщенного слоя, с концентрацией кислорода недостаточной для охрупчивания. Механические испытания образцов показали, что при образовании на поверхности охрупченных слоев глубиной более 20 мкм их долговечность при повторно–статических испытаниях не превышает (15...18) % от долговечности основного материала. Восстановление усталостных характеристик титановых сплавов предложено выполнять удалением поверхностного слоя толщиной не менее толщины охрупченного, например химическим травлением

Ключевые слова: титановые сплавы, охрупчивание, излом, циклическая выносливость, химическое травление

Введение

Титан как никакой другой конструкционный материал способен растворять большое количество кислорода [1]. Поэтому при высокотемпературной обработке взаимодействие титана с газами приводит не только к образованию химических соединений в виде отдельных фаз на поверхности металла (оксидов), но и к растворению газов в металле, сопровождающимся формированием газонасыщенных слоев.

Увеличение содержания кислорода в титане выше некоторого критического значения ($C_{кр} > 0,8\%$ [2]) приводит к охрупчиванию и потере служебных свойств: падает пластичность, прочность, сопротивление зарождению и распространению трещин и т.д. Очевидно, что та часть поверхностного слоя, где концентрация кислорода $C > C_{кр}$ должна иметь свойства, резко отличающиеся в отрицательную сторону от основного металла. Присутствие охрупченного

слоя на поверхности наиболее опасно для изделий, работающих под нагрузкой.

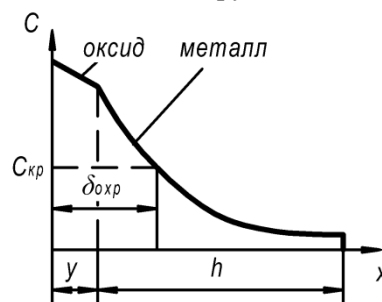


Рис. 1. Схема окисления титана, сопровождающегося растворением кислорода в металле, с образованием оксидной пленки: y – толщина оксидной пленки; $\delta_{охр}$ – глубина охрупченного слоя; h – глубина газонасыщенного слоя

В настоящее время изучение состояния поверхностных слоев титана выполняется несколькими методами, в том числе по микротвердости, микроструктуре, с помощью рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа, Оже-спектроскопии и т.д.

Основным недостатком этих методов является отсутствие возможности определения

величины наиболее опасной охрупченной части окисленного слоя.

В качестве интегральной характеристики, отражающей состояние, свойства материала и его поверхностных слоев, можно рассматривать вид излома, сформировавшегося при одинаковых условиях разрушения (напряженное состояние, вид и скорость нагружения, температура испытания и т.д.) [3]. Поэтому в качестве критерия охрупченности поверхностных слоев титана, обусловленной его взаимодействием с газами, выбран вид излома (хрупкий, вязкий), полученный при разрушении.

Целью данной работы было установление влияния на топографию поверхности разрушения и механические свойства титана окисдных и газонасыщенных слоев, образующихся на его поверхности в процессе отжига.

Результаты исследований

Строение изломов поверхностных слоев после газонасыщения изучали на образцах размером $30 \times 10 \times 3$ мм, изготавливаемых из серийно выпускаемого листового сплава ОТ4. Исследуемую поверхность образцов перед отжигом полировали и обезжиривали. Для образования поверхности излома образцы после отжига деформировали до разрушения изгибающим усилием в специальном приспособлении по схеме (рис. 2). С целью облегчения разрушения с обратной стороны образца делали надрез глубиной равной $2/3$ от его толщины. Под действием растягивающих напряжений от изгибающего момента в поверхностных слоях образца появлялись трещины и при увеличении нагрузки распространялись по его сечению.

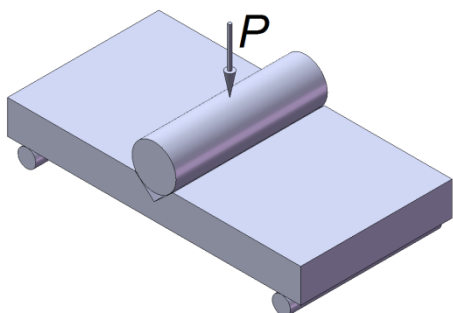


Рис. 2. Схема разрушения плоских образцов

В процессе отжига на поверхности образцов формировались оксидные пленки, толщину которых оценивали по их интерференционной окрашенности [1]. Глубину газонасыщенного слоя (h) оценивали путем замера микротвердо-

сти поверхности после регламентированного съема части поверхностного слоя на заданную величину химическим травлением в смеси азотной и плавиковой кислот. Скорость съема металла при этом составляла приблизительно 1 мкм/мин. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ–3 при нагрузке на индентор 0,5 Н.

О влиянии оксидных и газонасыщенных слоев, образовавшихся в процессе вакуумного отжига на механические свойства сплава ОТ4 судили по результатам испытаний образцов из листового проката толщиной 0,8 мм на повторно–статическое растяжение при коэффициенте асимметрии цикла $R=+0,1$, частоте 0,6–0,8 Гц и напряжении $\sigma_{max} \approx (0,6 \dots 0,8) \sigma_s$ на установке УММ–10 [4].

Поскольку испытания на повторно–статическое растяжение могут производиться при различных напряжениях, то в качестве характеристики материала целесообразно использовать не абсолютное значение числа циклов до разрушения, а относительное – $N_{отн}$ ($N_{отн} = N_a/N$, где N_a – количество циклов до разрушения образца после его вакуумного отжига, N – количество циклов до разрушения образца с полностью стравленным газонасыщенным слоем).

Типичные виды изломов образцов из сплава ОТ4 в состоянии поставки (без вакуумного отжига) после их разрушения изгибом приведены на рис. 3. Видно, что поверхность разрушения характеризуется вязким ямочным изломом, сформировавшимся по механизму зарождения и развития микронесплошностей.

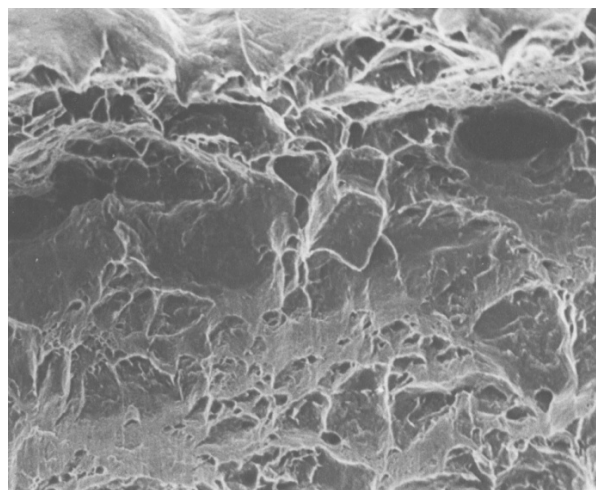
Виды изломов поверхностных слоев, сформировавшихся в процессе отжига в вакууме 2,6 Па при температурах 600 – 900 °С, приведены на рис. 4–6.

На поверхности изломов выделяются зона хрупкого разрушения, в пределах которой распространение трещины происходит в оксиде и охрупченной части газонасыщенного слоя титана, где $C > C_{кр}$ (см. рис. 1), и зона квазивязкого разрушения, в которой присутствуют гребни отрыва, переходящие в ямочный рельеф, сформировавшийся при распространении трещины в части газонасыщенного слоя с недостаточной для охрупчивания концентрацией кислорода.

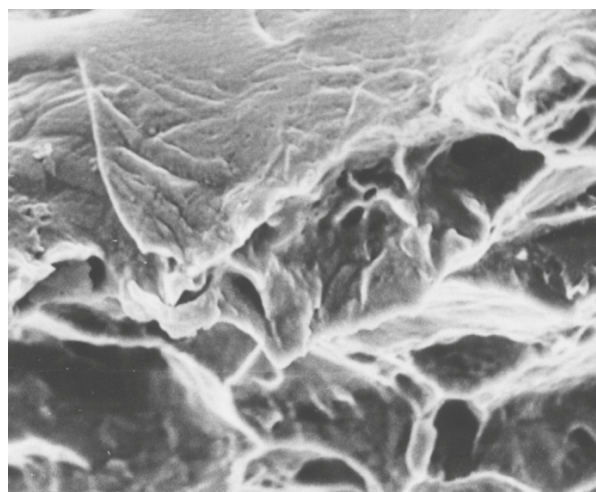
После отжига при $t \leq 600$ °С формируются охрупченные слои в виде пленки (корки) с достаточно выраженными границами раздела между этим слоем и металлом. В процессе деформации образца изгибом происходит дробление этого слоя, обусловленное различной пластичностью металла–подложки и находящегося на его поверхности слоя (см. рис. 4).



а ×9

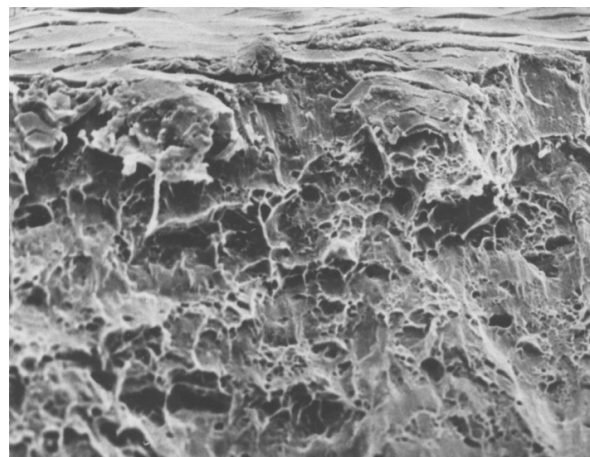


б ×1500

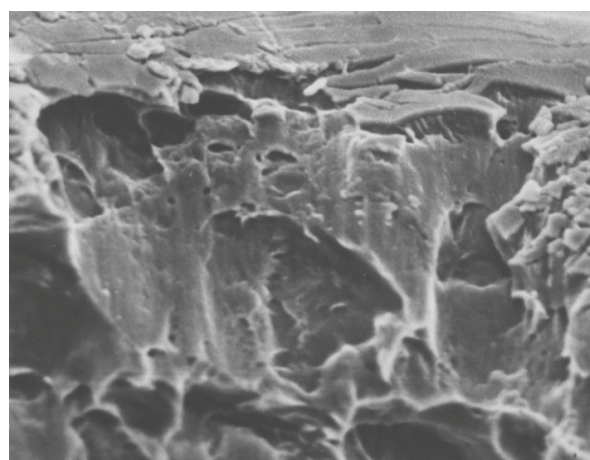


в ×10 000

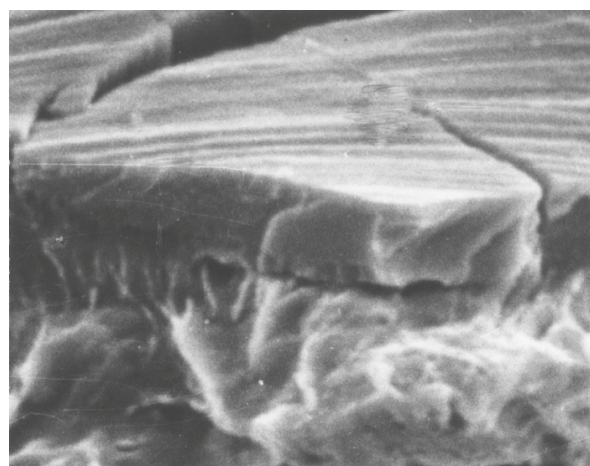
Рис. 3. Типичное макростроение (а) и микростроение (б, в) поверхностей разрушения образцов из сплава ОТ4 в исходном состоянии



а ×1500

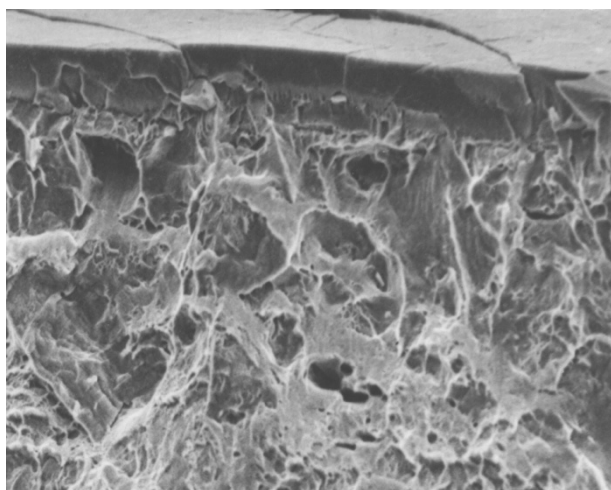


б ×5000

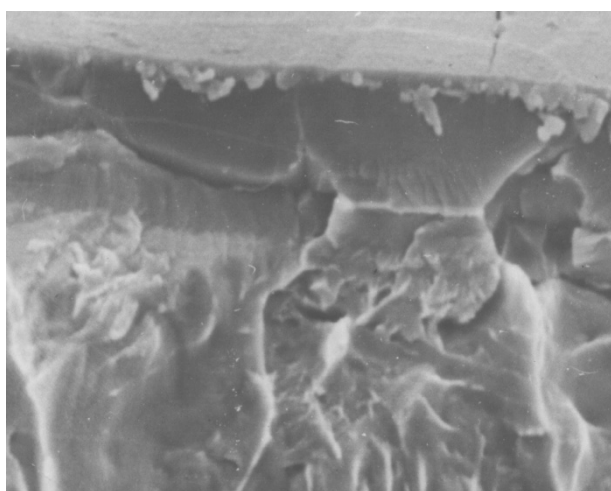


в ×25 000

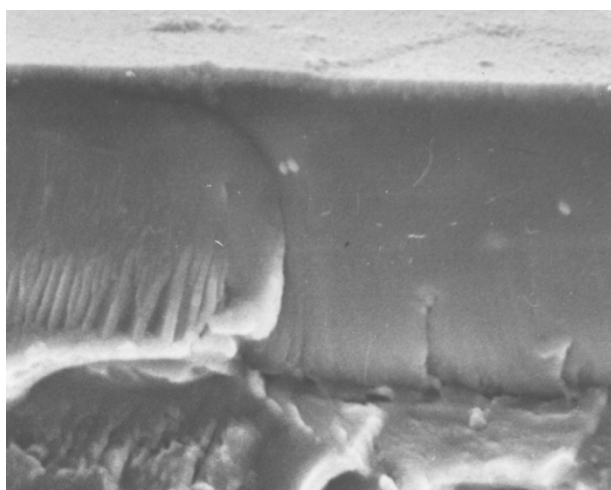
Рис. 4. Типичный вид изломов поверхностных слоев, сформировавшихся на сплаве ОТ4 в процессе отжига при 600 °С



a ×1500

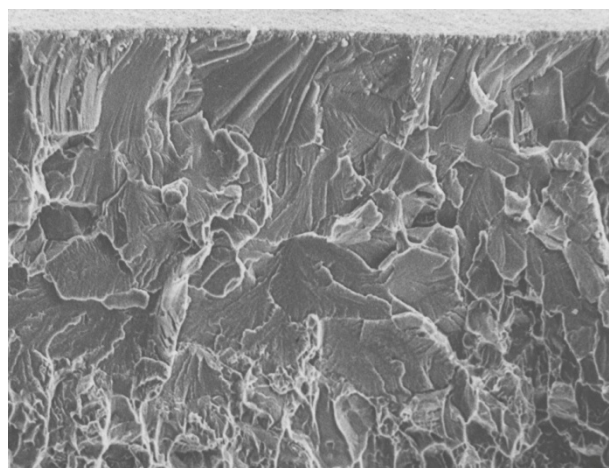


б ×5000

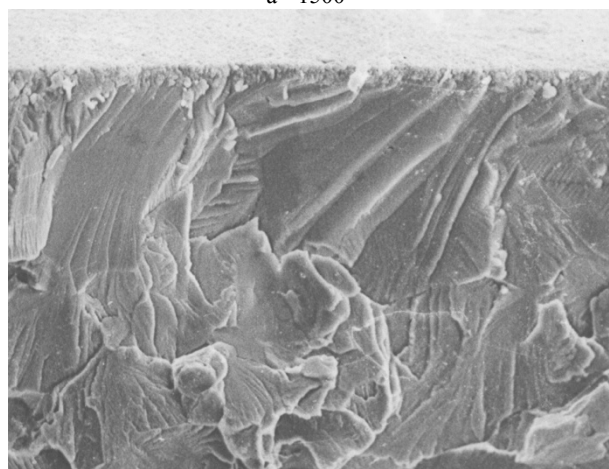


в ×10 000

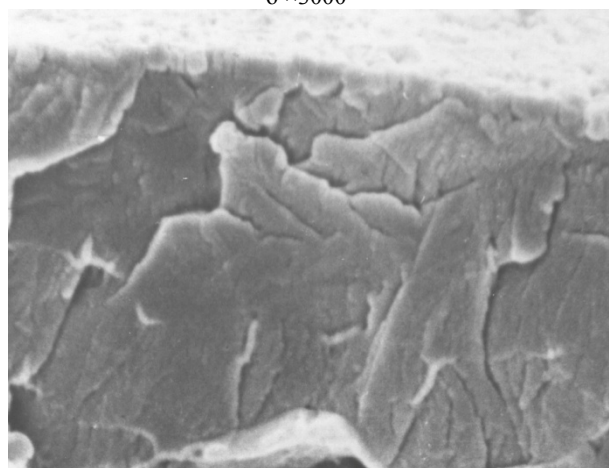
Рис. 5. Типичный вид изломов поверхностных слоев, сформировавшихся на сплаве ОТ4 в процессе отжига при 700 °С



a ×1500



б ×3000



в ×10 000

Рис. 6. Типичный вид изломов поверхностных слоев, сформировавшихся на сплаве ОТ4 в процессе отжига при 900 °С

Сопоставление полученных значений $\delta_{охр}$ (см. рис. 1) с толщиной оксидных пленок (y) на поверхности этих же образцов показывает, что $\delta_{охр} \gg y$, т.е. охрупченный слой состоит из оксида и части газонасыщенного слоя. При этом граница между оксидом и газонасыщенным слоем хотя и существует (о чем свидетельству-

ет четкая интерференционная окрашенность поверхности образца), но в изломе не выявляется (см. рис. 4, в). Это вероятно обусловлено высокой степенью когерентности кристаллических решеток оксида и газонасыщенного слоя на их границе.

После отжига при температурах 700 °С и выше охрупченный слой в изломе выглядит как единое целое с материалом подложки (рис. 5, 6). При глубине охрупченного слоя $\delta_{охр} < 10$ мкм поверхность скола выглядит сплошной полосой, содержащей незначительное количество ступенек (рис. 5). При больших размерах охрупченной части газонасыщенного слоя поверхность разрушения состоит из совокупности фасеток транскристаллитного излома (рис. 6).

О влиянии температуры вакуумного отжига в течение 60 мин. на толщину образующихся оксидных пленок (y), охрупченных ($\delta_{охр}$) и газонасыщенных (h) слоев можно судить по экспериментальным данным, приведенным в таблице.

t , °С	500	600	700	800	900
y , мкм	0,036	0,055	0,0608	0,11*	0,15*
$\delta_{охр}$, мкм	0,205	0,69	4,1	16,2	41,2
h , мкм	0,71	2,95	16,2	58,5	149,0

* – толщина оксида оценивалась по поверхности его разрушения в изломе образца

При этом величина микротвердости поверхностей образцов, замеренная при нагрузке на индентор 0,5 Н, с повышением температуры отжига от 500 до 900 °С возрастала от 3,7 ГПа до 10,6 ГПа, а глубина внедрения индентора уменьшалась от 2,23 мкм до 1,25 мкм, соответственно.

Из сопоставления результатов, приведенных в таблице, следует, что если после отжига при 500 °С толщины образующихся оксидных пленок и газонасыщенных слоев отличаются в разы, то после отжига при 900 °С эта разница составляет 2–3 порядка. При этом с повышением температуры от 500 °С до 900 °С доля толщины оксидной пленки в охрупченном слое ($y/\delta_{охр}$) уменьшается от ~17 % до ~0,3 %, а доля толщины охрупченной части в газонасыщенном слое ($\delta_{охр}/h$) практически не зависит от температуры и ее осредненное значение составляет ~26 %.

Такую закономерность в соотношении толщин оксидных и газонасыщенных слоев, образующихся при отжиге на поверхности титана в результате его взаимодействия с кислородом, можно объяснить тем, что рост оксидов

и газонасыщенных (в том числе охрупченных) слоев контролируется разными процессами. Согласно [1], рост оксидной фазы контролируется диффузией ионов титана в оксиде, а рост газонасыщенных слоев – диффузией ионов кислорода в титане. При этом энергии активации процессов образования оксидов (E_o) и поглощения кислорода металлической основой (E_p) составляют соответственно 106 и 258 кДж/моль [2], т.е. $E_p > E_o$, и с повышением температуры соотношение между толщинами образующихся оксидов и газонасыщенных слоев ($y/\delta_{охр}$) должно уменьшаться, что и наблюдается. Испытания образцов на повторно-статическое растяжение показали, что разрушение образцов происходит в малоцикловой области и наличие на их поверхности охрупченных слоев приводит к уменьшению циклической долговечности сплава ОТ4 (рис. 7).

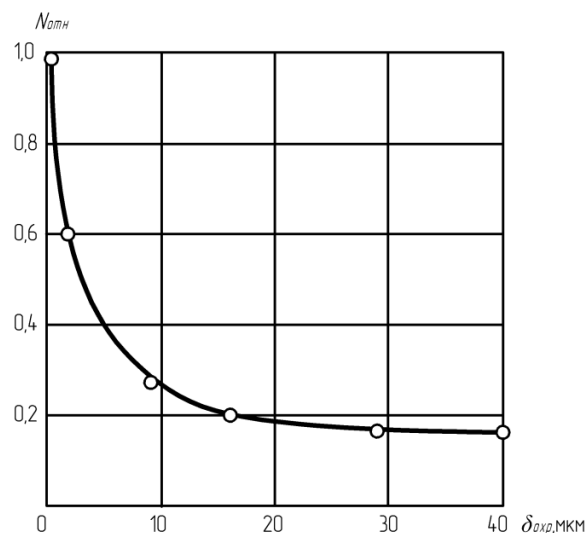
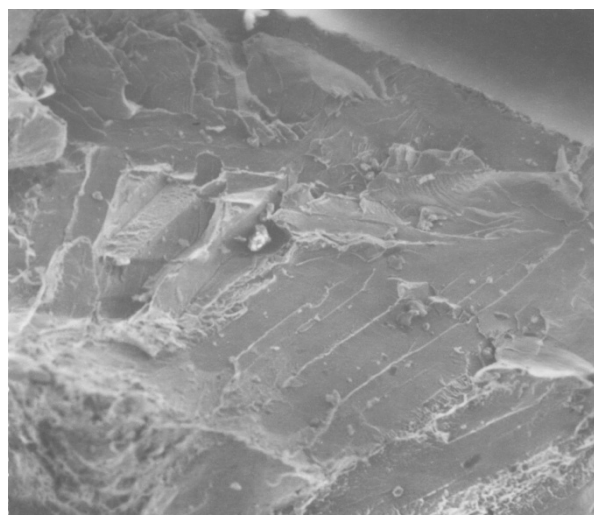
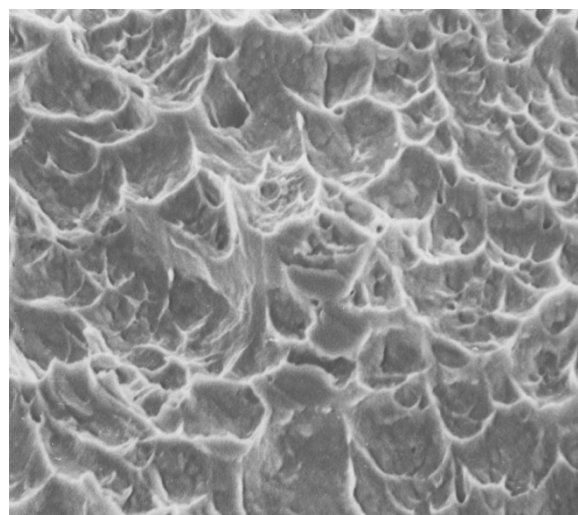


Рис. 7. Зависимость относительного числа циклов до разрушения образца из сплава ОТ4 при повторно-статическом растяжении $N_{отн}$ от толщины охрупченного слоя

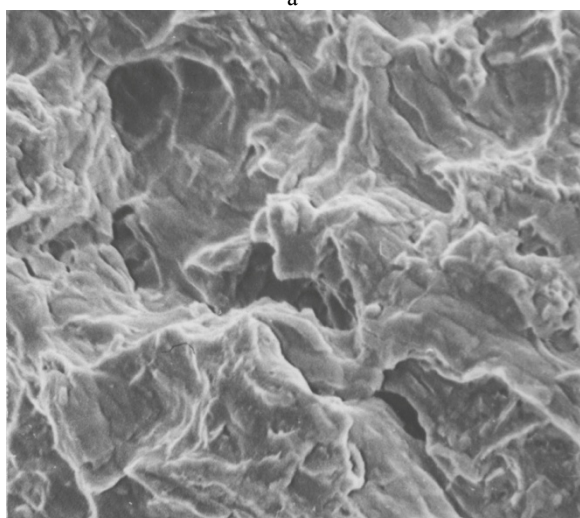
Топография поверхности разрушения образца после его отжига при 800 °С в течение 1 часа и испытания на повторно-статическое растяжение приведены на рис. 8. На поверхности разрушения присутствует зона зарождения и распространения трещины в охрупченном слое (рис. 8, а), переходящая в участок газонасыщенного слоя, где $C < C_{кр}$ (рис. 8, б, в), и зону долома (рис. 8, г), характеризующуюся мелкоячейным изломом, сформировавшимся по механизму зарождения и слияния несплошностей, типичному для разрушения сплава ОТ4.



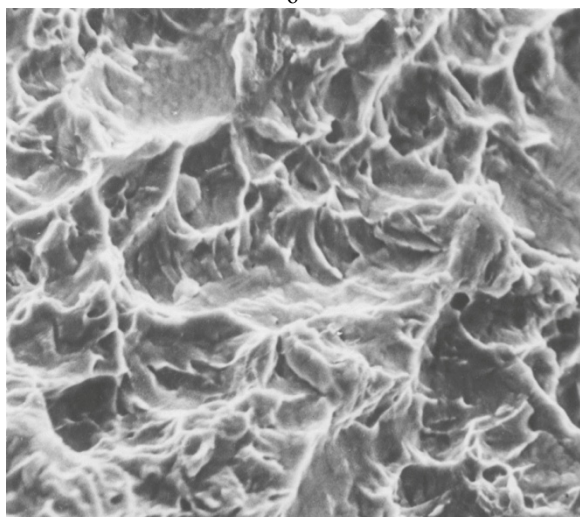
а



г



б



в

Рис. 8. Топография поверхности разрушения после испытания на повторно-статическое растяжение: а – зона зарождения трещины; б, в – зона распространения трещины; г – зона долома, $\times 4000$

Рис. 8. Топография поверхности разрушения после испытания на повторно-статическое растяжение: а – зона зарождения трещины; б, в – зона распространения трещины; г – зона долома, $\times 4000$ (продолжение)

Из зависимости $N_{отн} = f(\delta_{охр})$, приведенной на рис. 7, следует, что наличие на поверхности образцов охрупченных слоев $\delta_{охр} \leq (10 \dots 15)$ мкм приводит к значительному снижению их усталостных характеристик, дальнейшее увеличение глубины охрупченных слоев снижает служебные свойства в меньшей степени. При $\delta_{охр} > 20$ мкм долговечность образцов при повторно-статических испытаниях не превышает $(15 \dots 18)$ % от долговечности основного материала.

Технологическим приемом, обеспечивающим восстановление усталостных характеристик титановых сплавов, содержащих на поверхности газонасыщенные слои, может быть удаление этих слоев, например химическим травлением в смеси азотной и плавиковой кислот. После каждого травления измерялась толщина образца, выполнялась подполировка мелкозернистой шкуркой не более чем на 1-2 мкм и производился замер микротвердости.

После травления на регламентированную глубину образцы подвергали испытаниям на повторно-статическое растяжение. Зависимость относительного числа циклов до разрушения образца и величины микротвердости поверхности от толщины удаленного слоя приведены на рис. 9. Результаты испытаний показывают, что с увеличением глубины съема газонасыщенного слоя микротвердость поверхности падает, а количество циклов до разрушения растет.

Анализ результатов позволяет выявить две закономерности. Во-первых, удаление части газонасыщенного поверхностного слоя толщи-

ной равной толщине охрупченного ($l = \delta_{охр}$) приводит к повышению долговечности до уровня сплава ОТ4 в состоянии поставки.

Во-вторых, неполный съем газонасыщенного слоя обеспечивает большую долговечность, чем полный. Максимум повторно-статической выносливости, превышающий уровень выносливости материала в состоянии поставки, достигается при удалении слоя толщиной $l \approx 2,6 \cdot \delta_{охр}$ (рис. 9).

Повышение долговечности при неполном стравливании газонасыщенного слоя обусловлено, вероятно, получением некоторого оптимального значения концентрации примесей внедрения (кислорода) в поверхностном слое и, как следствие этого, увеличением времени, которое необходимо для зарождения критической микротрещины.

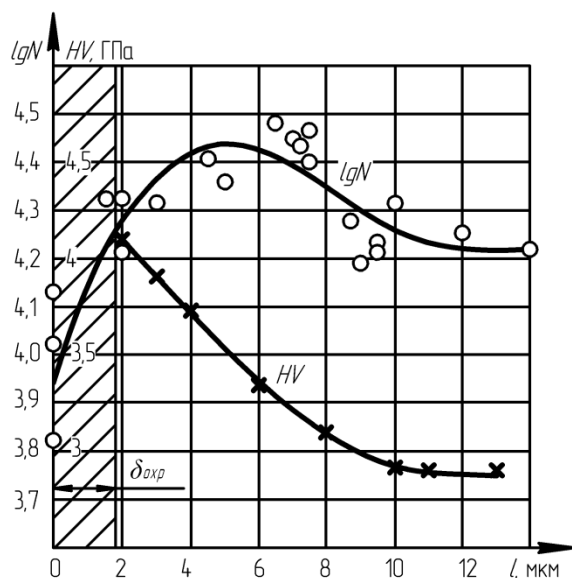


Рис. 9. Зависимость числа циклов до появления трещин при повторно-статическом растяжении ($lg N$) и микротвердости поверхности (HV) образцов из листового сплава ОТ4 толщиной 0,8 мм от глубины съема (l) газонасыщенного слоя, сформировавшегося в процессе отжига при 650 °С в течение 1 часа

Выводы

1. При оценке служебных свойств изделий из титановых сплавов после высокотемпературного отжига в газовых средах обобщенной характеристикой состояния поверхности может служить глубина охрупченного слоя.

2. В качестве критерия охрупченности поверхностных слоев на титане предложено использовать вид их излома (хрупкий, вязкий), образующийся при разрушении, например, изгибом.

3. При образовании на поверхности сплава ОТ4 охрупченных слоев глубиной более 20 мкм его долговечность при повторно-статических испытаниях не превышает (15...18) % от долговечности основного материала.

4. Восстановление циклической долговечности сплава ОТ4 после высокотемпературной обработки до исходного уровня достигается удалением поверхностного слоя толщиной $l \geq \delta_{охр}$, а максимальный уровень повторно-статической выносливости достигается при удалении слоя толщиной $l \approx 2,5 \cdot \delta_{охр}$.

Литература

1. Окисление титана и его сплавов / А.С. Бай, Д.И. Лайнер, Е.Н. Слесарева, М.И. Ципин. М.: Металлургия, 1970. 320 с.
2. Цвиккер У. Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979. 511 с.
3. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: Машиностроение, 1978. 71 с.
4. Повторно-статическая выносливость листового сплава ОТ4 с не полностью удаленным поверхностным газонасыщенным слоем / А.Б. Коломенский, Б.А. Колачев, А.Н. Рошупкин, А.В. Дегтярев // Физико-химическая механика материалов. 1989. № 5. С. 112–114.

Поступила 27.09.2019; принята к публикации 09.12.2019

Информация об авторах

Булков Алексей Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-960-124-38-11, e-mail: abulkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7326-4846>

Пешков Владимир Владимирович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-473-278-38-84, e-mail: vlvlpeshkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-6574>

Коломенский Александр Борисович – д-р техн. наук, профессор, главный металлург, ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), тел. 8-910-244-38-95, e-mail: kolomen-skii_alek@inbox.ru

Бокарев Дмитрий Игоревич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-950-765-20-26, e-mail: dbokarev@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2438-4219>

Селиванов Георгий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-473-278-38-84, e-mail: selivanovgv@bk.ru

INFLUENCE OF VACUUM ANNEALING ON TOPOGRAPHY OF DESTRUCTION SURFACES AND REPEATED-STATIC ENDURANCE OF ALLOYS OT4

A.B. Bulkov¹, V.V. Peshkov¹, A.B. Kolomenskiy², D.I. Bokarev¹, G.V. Selivanov¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²PJSC "VASO", Voronezh, Russia

Abstract: heating of titanium to high temperatures leads to the formation of oxide and gas-saturated layers on its surface, while the mechanical characteristics of the material and, in the first place, plasticity, sharply deteriorate. In this article, as a criterion for the embrittlement of surface layers on titanium, it is proposed to use the form of their fracture formed upon failure, for example, by bending. We studied the structure of fractures on polished samples of size 30×10×3 mm from OT4 sheet alloy, which were annealed in a vacuum of 2.6 Pa at temperatures of 600-900 °C and then destroyed by bending force. The thickness of the oxide films was estimated by their interference coloration, and the depth of the gas-saturated layer - by measuring the surface microhardness after the regulated removal of part of the surface layer by chemical etching. The effect of oxide and gas-saturated layers on the mechanical properties of the OT4 alloy was judged by the results of tests of 0.8 mm thick sheet metal samples on repeated static tension at a cycle asymmetry coefficient of $R=+0.1$, a frequency of 0.6–0.8 Hz, and stresses $\sigma_{max} \approx (0.6...0.8) \sigma_v$ at the UMM-10 installation. The structure of fractures makes it possible to reveal a brittle fracture zone corresponding to the propagation of a crack in an oxide and a brittle part of a gas-saturated layer and a quasi-viscous fracture zone in which the separation crests transform into a dimple formed during crack propagation in a part of a gas-saturated layer with an oxygen concentration insufficient for embrittlement. Mechanical tests of the samples showed that when brittle layers with a depth of more than 20 microns are formed on the surface, its durability during repeated-static tests does not exceed (15...18)% of the durability of the base material. The restoration of the fatigue characteristics of titanium alloys, it is proposed to perform the removal of the surface layer with a thickness not less than the thickness of embrittle, for example, by chemical etching

Key words: titanium alloys, embrittlement, cyclic endurance, annealing, chemical etching

References

1. Bai A.S., Liner D.I., Slesareva E.N., Qiping M.I. "Oxidation of titanium and its alloys" ("Okisleniye titana i ego splavov"). Moscow: Metallurgy, 1970, 320 p.
2. Zwicker W. "Titanium and its alloys" ("Titan i ego splavy"), Moscow, Metallurgiya, 1976, 447 p.
3. Gordeeva T.A., Zhegina I.P. "Analysis of kinks in assessing the reliability of materials" ("Analiz izlomov pri otsenke nadezhnosti materialov"), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 71 p.
4. Kolomenskiy A.B., Kolachev B.A., Roshhupkin A.N., Degtjarev A.V. "Restatic endurance of sheet alloy OT4 with incompletely remote gas-saturated surface layer", *Physical and Chemical Mechanics of Materials (Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov)*, 1989, no. 5, pp. 112–114.

Submitted 27.09.2019; revised 09.12.2019

Information about the authors

Aleksey B. Bulkov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: abulkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7326-4846>

Vladimir V. Peshkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: vlvlpeshkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-6574>

Aleksandr B. Kolomenskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, PJSC "VASO" (27 Tsiolkovskogo st., Voronezh, 394026, Russia), e-mail: kolomenskiy_alek@inbox.ru

Dmitriy I. Bokarev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: dbokarev@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2438-4219>

Georgiy V. Selivanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: selivanovgv@bk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СКРЫТОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ВНУТРЕННИХ ВИНТОВЫХ КАНАВОК С БОЛЬШИМИ УГЛАМИ ПОДЪЕМА СПИРАЛИ**В.В. Куц, Д.С. Гридин****Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия**

Аннотация: показаны результаты исследования на основе компьютерного моделирования процесса протягивания с целью установления влияния скорости резания инструмента, обеспечивающей обработку внутренних винтовых канавок с большими углами подъема спирали. Рассмотрены случаи обработки винтовых канавок в тонкостенных деталях протяжкой с различным диапазоном скоростей резания. Предложена новая принципиальная схема обработки для реализации скрытой кинематической связи при обработке внутренних винтовых канавок. Проведены исследования процесса протягивания с целью установления влияния скоростей резания на формирование скрытой кинематической связи, при которых не образуется заусенцев в процессе обработки винтовых канавок. Приведены графики зависимости величины скорости резания от полученного после обработки угла наклона винтовой канавки, а также определены уравнения регрессии, описывающие полученную зависимость. Согласно статистическому анализу данных, полученных из графика, рассчитаны коэффициенты детерминации для линейной регрессии, подтверждающие статистическую значимость полученных коэффициентов. Проведен анализ полученных результатов исследований, согласно которому были установлены рекомендуемые диапазоны скоростей резания для рассмотренных углов наклона спирали при обработке внутренних винтовых канавок с большими углами подъема спирали

Ключевые слова: протяжка, винтовая канавка, геометрическая модель, передний угол, задний угол, формообразование

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90057

Введение

Повышение производительности и эффективности обработки винтовых поверхностей является актуальной задачей, особенно в условиях среднесерийного и массового производства [1].

В настоящее время существует множество способов обработки внутренних винтовых поверхностей рис. 1 (в частности, резьб с малыми углами подъема витков), которые основаны на согласованном перемещении инструмента и заготовки, реализуемом в большинстве случаев кинематикой станка.

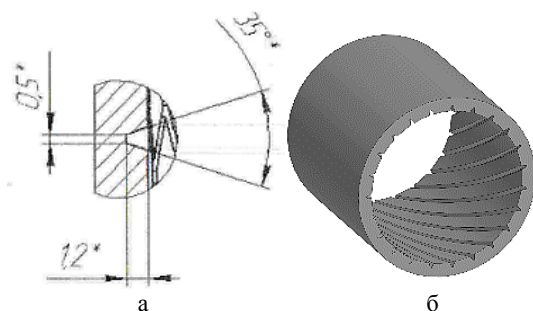


Рис. 1. Обрабатываемая деталь: а - трехмерная модель изделия с углом наклона винтовой канавки 30° ; б - геометрические параметры винтовой канавки

Однако методов для нарезания внутренних винтовых разнонаправленных канавок с большими углами подъема спирали (более 30°) очень мало [2]. Одни из них характеризуются низкой производительностью, другие – высокой себестоимостью обработки.

Предложенный способ обработки

Для того чтобы повысить эффективность обработки при нарезании внутренних винтовых канавок, необходимо осуществить одновременную обработку множества канавок на станке, реализующем простое поступательное движение (станке с простой кинематикой) с использованием специального инструмента, реализующего скрытую кинематическую связь между его поступательным движением и вращением, возникающим в процессе контактного взаимодействия режущих кромок инструмента с материалом заготовки (рис. 2).

Для реализации предложенного способа обработки необходимо провести исследование влияния скорости резания на величину угла подъема спирали нарезанной винтовой канавки, которое было выполнено в программном комплексе DEFORM-3D.

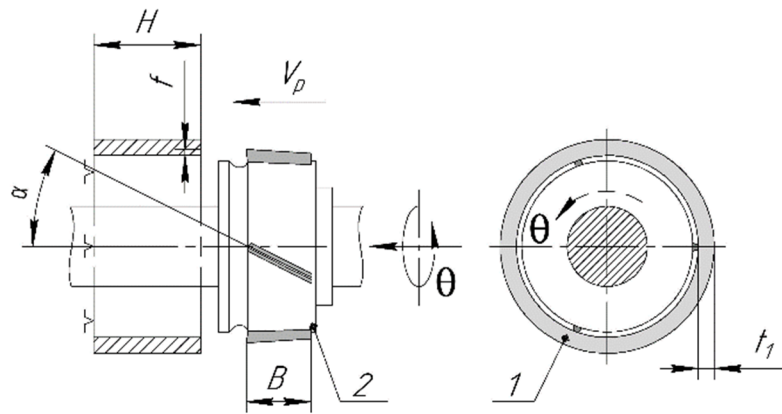


Рис. 2. Схема обработки внутренних винтовых канавок в тонкостенных деталях протяжкой, реализующей скрытую кинематическую связь: 1 – обрабатываемая заготовка, 2 – участка заготовки, мм; B – ширина зуба протяжки, мм; V_p – скорость резания, м/мин.; θ – угол поворота инструмента при его поступательном движении, град. t_1 – толщина стенки заготовки, мм; f – величина подъема на зуб (слоя срезаемого одним рядом режущих зубьев), мм; α – угол наклона зуба инструмента (номинальный угол наклона спирали), град.

Расчет № 1. Исследование зависимости влияния скорости резания на угол винтовой канавки при угле спирали $\alpha = 25^\circ$

Для проведения расчета были спроектированы упрощенные трехмерные модели инструмента, представляющие из себя один ряд режущих зубьев будущей протяжки с углами спирали $\alpha=25^\circ$ и 30° , а также участок заготовки (рис. 3).

По методике Маргулиса [3, 4] были определены рекомендуемая скорость резания в $V_p=2$ м/мин., подъем на зуб $f=0,3$ мм для материала режущей части протяжки - сталь P18.

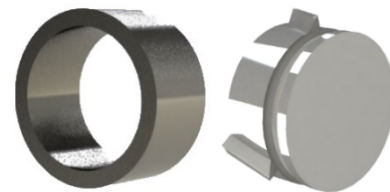


Рис. 3. Трехмерная модель участка режущих зубьев протяжки и заготовки

В результате проведенных исследований из рис. 4 видно, что при $\alpha = 25^\circ$ в диапазоне скоростей $V_p=0,2..1,6$ м/мин. резания угол наклона винтовой канавки ω° изменяется в пределах $\pm 30'$.

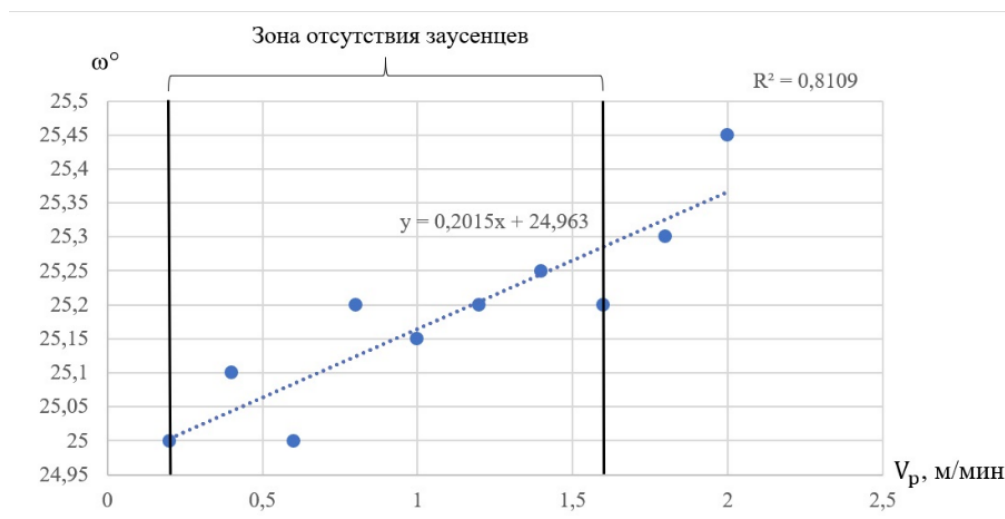


Рис. 4. График изменения угла наклона винтовой канавки ω от скорости резания V_p при угле наклона спирали $\alpha = 25^\circ$

По результатам анализа данных из графика рис. 4 зависимость параметра ω от V_p при угле спирали $\alpha = 25^\circ$ описывается уравнением (1)

$$\omega = 0,2015V_p + 24,963 \quad (1)$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,8109$.

На основании проведенных исследований также установлено, что в диапазоне скоростей $V_p=1,6..2$ м/мин. будет происходить заламывание стружки на одну из сторон винтовой канавки (образуются заусенцы), что в дальнейшем

может потребовать дополнительной механической обработки рис. 5.

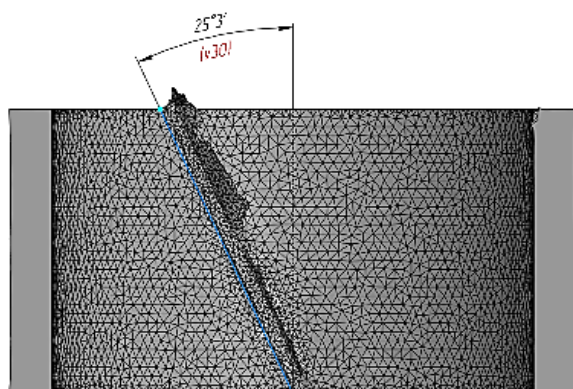


Рис. 5. Угол винтовой канавки, полученный при скорости резания $V_p = 2$ м/мин. и угле наклона спирали $\alpha = 25^\circ$

Расчет № 2. Исследование зависимости влияния скорости резания на угол винтовой канавки при угле спирали $\alpha = 30^\circ$

Проведение исследования процесса протягивания винтовой канавки с углом наклона спирали $\alpha = 30^\circ$ показало рис. 6, что диапазон скоростей резания, при котором не происходит заламывания стружки, значительно сужается и находится уже в пределах $V_p = 0,2 \dots 1$ м/мин., а изменение угла наклона винтовой канавки ω при этом остается в том же диапазоне $\pm 30'$ (рис. 6), при этом в диапазоне скоростей $V_p = 1,6 \dots 2$ м/мин. происходит также деформирование стенок заготовки рис. 7.

По результатам анализа данных из графика рис. 6 зависимость параметра ω от V_p при угле спирали $\alpha = 30^\circ$ описывается уравнением (2)

$$\omega = 0,4773V_p + 29,73 \quad (2)$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,961$.

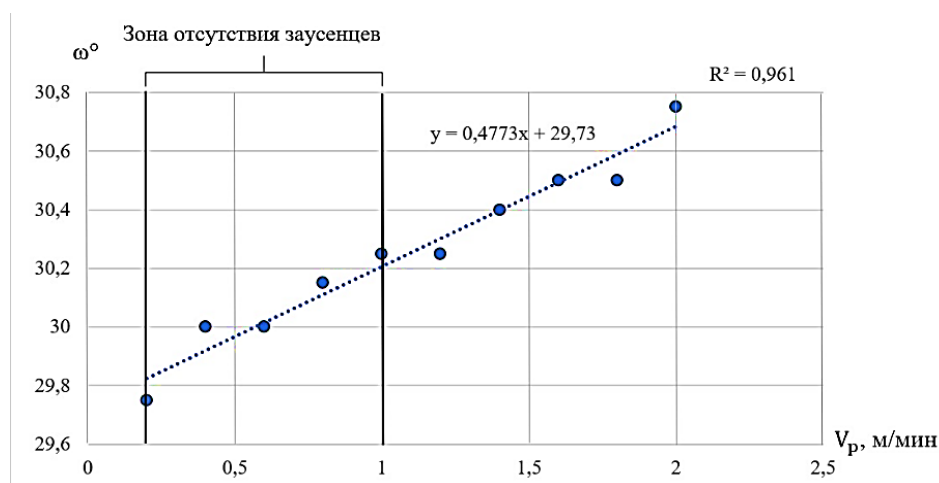


Рис. 6. График изменения угла наклона винтовой канавки от скорости резания при угле наклона спирали $\alpha = 30^\circ$

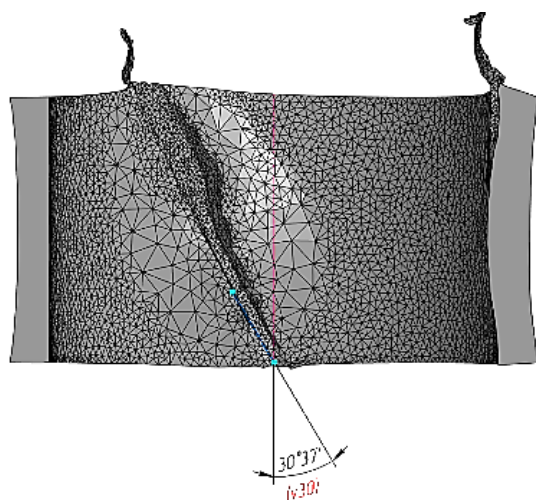


Рис. 7. Угол винтовой канавки, полученный при скорости резания $V_p = 2$ м/мин. и угле наклона спирали $\alpha = 30^\circ$

Выводы

Таким образом, на основании полученных результатов исследований было установлено, что при варьировании скорости резания V_p в диапазоне $0,2 \dots 2$ м/мин. погрешность угла наклона спирали нарезанной винтовой канавки составляет не более 4%, а наибольшая производительность процесса протягивания винтовой канавки без образования заусенцев достигается при $V_p = 1,6$ м/мин. и угле спирали $\alpha = 25^\circ$; при $V_p = 1$ м/мин. и угле спирали $\alpha = 30^\circ$ (рис. 8).

В дальнейшем основной задачей исследования будет являться изучение влияния геометрических параметров инструмента на процесс обработки внутренних винтовых канавок с большими углами подъема спирали протяжкой, реализующей скрытые кинематические связи при резании.

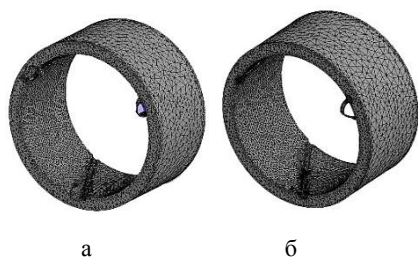


Рис. 8. Результат обработки винтовой канавки:
а) при скорости резания $V_p = 1,6$ м/мин. и угле спирали $\alpha = 25^\circ$; б) при скорости резания $V_p = 1$ м/мин. и угле спирали $\alpha = 30^\circ$

Литература

1. Пат. 2457428 Российская Федерация № 2011102983/83. Способ изготовления оболочки осколочного боеприпаса; заявл. 26.01.11; опубл. 27.07.12, Бюл. № 21. 6 с.
2. Амбросимов С.К. Перспективы развития протягивания // Современные материалы, техника и технология: сб. науч. ст. 8-й междунар. науч.-практ. конф., 2018. С. 18-22.
3. Маргулис Д.К., Тверской М.М., Ахимшин В.Н. Протяжки для обработки отверстий. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
4. Режущий инструмент / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников и др. М.: Машиностроение, 2007. 528 с.

Поступила 18.10.2019; принята к публикации 09.12.2019

Информация об авторах

Кук Вадим Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
Гридин Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: swsu.st@inbox.ru

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CUTTING SPEED ON THE FORMATION OF HIDDEN KINEMATIC CONNECTION WHEN STRENGTHENING INTERNAL HELICAL GROOVES WITH LARGE ANGLES OF SPIRAL LIFTING

V.V. Kuts, D.S. Gridin

Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract: the article shows the results of the study based on computer simulation of the pulling process in order to establish the influence of the cutting speed of the tool, providing processing of the internal helical grooves with large angles of the spiral. Cases of processing helical grooves in thin-walled parts with a broach with a different range of cutting speeds are considered. A new processing concept was proposed for the implementation of hidden kinematic connection in the processing of internal helical grooves. Investigations of the pulling process were carried out in order to establish the influence of cutting speeds on the formation of a hidden kinematic connection, at which no burrs are formed during the processing of helical grooves. Graphs of the dependence of the cutting speed on the obtained after processing the angle of inclination of the helical grooves are presented, as well as the regression equations describing the obtained dependence are determined. According to the statistical analysis of the data obtained from the graph, the coefficients of determination for linear regression are calculated, confirming the statistical significance of the obtained coefficients. The analysis of the obtained research results was carried out, according to which the recommended ranges of cutting speeds were established for the considered angles of inclination of the spiral when machining internal helical grooves with large angles of elevation of the spiral

Key words: broach, helical groove, geometric model, rake angle, trailing angle, shaping

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90057

References

1. "A method of manufacturing a shell of fragmentation ammunition", Pat. 245474 RF No. 2011102983/83; declared 01/26/11; publ. 07/27/12, bull. no. 21, 6 p.
2. Ambrosimov S.K. "Prospects for the development of stretching", Proc. of the 8th International Scientific and Practical Conference: Modern Materials, Equipment and Technology (*Sbornik nauchnykh statey 8-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya*), 2018, p. 18-22.
3. Margulis D.K., Tverskoy M.M. Akhimshin V.N. "Broaches for hole machining" ("Prot'yazhki dlya obrabotki otverstiy"), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 232 p.
4. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.A. et al. "Cutting tool" ("Rezhushchiy instrument"), Moscow, Engineering, 2007, 528 p.

Submitted 18.10.2019; revised 09.12.2019

Information about the authors

Vadim V. Kuts, Dr. Sc. (Technical), Professor, Southwest State University (94, 50 Years of October st., Kursk 305040, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Dmitriy S. Gridin, Graduate student, Southwest State University (94, 50 Years of October st., Kursk 305040, Russia), e-mail: swsu.st@inbox.ru