

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Идентификация линейных динамических окрестностных моделей с нечеткой иерархической структурой И.А. Седых	7
Разработка методики формирования сквозного технологического процесса в цифровом производстве А.В. Бредихин, М.В. Кузнецов, Ю.М. Школьников	14
Целевая архитектура гибридного аналитического хранилища данных для предприятия электронной коммерции С.Л. Подвальный, В.Ф. Барабанов, Ф.Г. Логинов, С.А. Коваленко	19
Оценка качества теста внутрисхемного контроля цифровых схем Г.В. Петрухнова	30

Радиотехника и связь

Исследование изменения геометрии линзы Ротмана для размещения на подвижных носителях Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, С.М. Фёдоров, В.И. Чугуевский	36
Алгоритмы обработки речевого сигнала при переменной длительности сегмента анализа А.А. Афанасьев, Р.С. Власов, В.Г. Лисичкин, А.В. Питолин	41
Математическая модель взвешенной оценки канала радиосвязи для многоантенных OFDM-систем О.Н. Чирков	49
Разработка системы бесконтактного считывания ЭКГ сигналов Д.В. Журавлев, И.А. Сафонов, И.В. Остроумов, И.С. Анисимов	55
Влияние расположения TSV-отверстий и RDL-слоёв на теплораспределение в 3D-DRAM Д.А. Хараджиди, К.Н. Багнюков, Н.В. Ципина, А.В. Муратов	63
Эволюция воспринимаемой частоты сферической волны И.П. Попов	69
Методика построения градиентных карт ближнего электромагнитного поля двухсторонних и многослойных печатных плат М.А. Ромашенко, А.Л. Неклюдов, Д.В. Васильченко	74
Релаксационный полустохастический итерационный декодер для LDPC-кодов М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова	79
Итеративная методика помехоустойчивого приема QAM-сигналов О.Н. Чирков, А.О. Кузнецова	84
Прогнозирование деградационных процессов современных ламповых устройств и анализ их эффективных преимуществ перед полупроводниковыми А.В. Башкиров, С.Е. Иванников, А.М. Колядина, А.С. Демихова	89

Машиностроение и машиноведение

Основные принципы построения технического обслуживания и диагностики многофазового жидкостного ракетного двигателя космического назначения А.Ф. Ефимочкин, А.А. Пономарев, М.А. Любинецкий.....	95
Оптимизация скорости резания и периода замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации А.В. Анцев, Н.И. Пасько.....	102
Проектирование технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олещицкий, Ю.Э. Симонова.....	111
Использование жидкостного ракетного двигателя с дополнительной форсажной турбиной на ракете-носителе с возможностью резервирования В.Д. Горохов, М.А. Любинецкий, А.А. Пономарев.....	119
Формообразование труб с применением гибкого наполнителя В.И. Максименков, М.В. Молод, В.И. Федосеев.....	124
Конструктивные решения генераторов ударных импульсов для упрочняющей обработки специальных деталей В.Э. Парфенов, А.В. Хандожко.....	128
Формирование волнистости обрабатываемой поверхности при выхаживании шлифовальным кругом С.Г. Бишутин, А.А. Козленкова.....	135
Расширение технологических возможностей мобильного фрезерного оборудования А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко, А.А. Козлов.....	140

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Identification of linear dynamic neighborhood models with fuzzy hierarchical structure I.A. Sedykh	7
Development of the method of forming the end-to-end technological process in digital production A.V. Bredikhin, M.V. Kuznetsov, Yu.M. Shkol'nikova	14
Target architecture of a hybrid analytical data warehouse for an e-commerce enterprise S.L. Podval'ny, V.F. Barabanov, F.G. Loginov, S.A. Kovalenko	19
Quality evaluation of the in-circuit control test of digital circuits G.V. Petrukhnova	30

Radio engineering and communication

Study of changes of Rotman lens geometry for placing on mobile carriers L.N. Korotkov, Yu.G. Pasternak, S.M. Fyedorov, V.I. Chuguevskiy	36
Speech signal processing algorithms at variable duration of the analysis segment A.A. Afanas'ev, R.S. Vlasov, V.G. Lisichkin, A.V. Pitolin	41
Mathematical model of the windowed radio channel estimation for multi-antennate OFDM systems O.N. Chirkov	49
Development of contactless ECG signals reading system D.V. Zhuravlev, I.A. Safonov, I.V. Ostroumov, I.S. Anisimov	55
Effect of location TSV and RDL on thermal distribution in 3D-DRAM D.A. Kharajidi, K.N. Bagnyukov, N.V. Tsipina, A.V. Muratov	63
Evolution of perceived frequency of spherical wave I.P. Popov	69
Technique of construction of gradient cards of the near electromagnetic field of bilateral and multilayered PCB M.A. Romashchenko, A.L. Neklyudov, D.V. Vasil'chenko	74
Relaxation iteration semistochastic decoders for LDPC codes M.V. Khoroshaylova, I.V. Sviridova	79
Iterative technique of interference-resistant reception of QAM-signals O.N. Chirkov, A.O. Kuznetsova	84
Forecasting degradation processes of modern tube devices and analysis of their effective advantages over semi-conductors A.V. Bashkirov, S.E. Ivannikov, A.M. Kolyadina, A.S. Demikhova	89

Mechanical engineering and science of machines

Basic principles of building, maintenance service and diagnostics of reusable liquid rocket engine of space application A.F. Efimochkin, A.A. Ponomarev, M.A. Lyubinetskiy	95
Optimization of the cutting speed and the cutting tool replacement period in the statistical adaptation mode A.V. Antsev, N.I. Pas'ko	102

Designing technological equipment for additive forming with a hybrid component A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, A.V. Oleshitsky, Yu.E. Simonova.....	111
Using liquid-propellant rocket engine with an additional afterburner on the carrier rocket with the possibility of redundancy V.D. Gorokhov, M.A. Lyubinetskiy, A.A. Ponomarev.....	119
Formation of pipes with the application of the flexible filler V.I. Maksimenkov, M.V. Molod, V.I. Fedoseev.....	124
Constructive solutions of the shock pulse generator for hardening treatment of special parts V.E. Parfenov, A.V. Khandozhko	128
Forming waviness of the processed surface when rubbing by an abrasive wheel S.G. Bishutin, A.A. Kozlenkova.....	135
Expansion of technological capabilities of mobile milling equipment A.M. Kozlov, E.V. Kiryushchenko, A.A. Kozlov.....	140

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.4.001

УДК 519.711

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ С НЕЧЕТКОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

И.А. Седых

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: окрестностные модели и их модификации применяются для моделирования различных распределенных систем и процессов. Дано определение неиерархической динамической окрестностной модели с векторными входами и состояниями, функционирующей в дискретном времени. Приведены уравнения функции пересчета состояний в случаях полного и неполного графа структуры. Показан общий вид линейной функции пересчета состояний. Рассмотрен пример состоящей из двух узлов динамической окрестностной модели, для которой приведены граф структуры, матрицы смежности и уравнения пересчета состояний в общем и линейном случаях. Приведено понятие двухуровневой нечеткой динамической окрестностной модели с нечеткой иерархической структурой, каждый узел первого уровня которой нечетко связан с входящими в него узлами второго уровня. Рассмотрен алгоритм нечеткой структурной и параметрической идентификации двухуровневой окрестностной модели, показана его блок-схема. Приведен пример структурной и параметрической идентификации линейной динамической окрестностной модели с нечеткой иерархической структурой. Показано, что на тестовых данных введение нечеткой иерархической структуры в несколько раз уменьшает среднюю квадратическую ошибку идентификации и значительно улучшает адекватность окрестностной модели

Ключевые слова: линейные динамические окрестностные модели, иерархия, нечеткая структура, структурная и параметрическая идентификация

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-48-480007 p_a)

Введение

При разработке моделей динамических производственных систем возникает задача выбора адекватной математической модели, связанная со сложной структурой взаимосвязей между элементами системы и изменением состояний объекта во времени. Проблема моделирования и управления такими объектами связана как с распределенностью системы, так и с наличием нелинейных связей между подсистемами.

Перспективным направлением в моделировании сложных систем являются окрестностные модели [1-3], отражающие связи между узлами некоторого реального объекта или процесса и позволяющие адекватно представлять сложные пространственно-распределенные системы, изменяющиеся во времени [4-7].

Рассматриваемые в работе линейные динамические окрестностные модели с нечеткой иерархической структурой являются расширением введенных ранее окрестностных моделей и отличаются нечеткими иерархическими связями между узлами окрестностной модели, что

приводит к повышению точности при решении задач идентификации и управления.

Понятие неиерархической динамической окрестностной модели

Дадим определение неиерархической динамической окрестностной модели [8]. Пусть задано множество узлов окрестностной модели $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. Каждому узлу a_i , $i=1, \dots, n$ в текущий момент времени t соответствует векторное состояние $X[t, a_i] = X[t, i] \in \mathbf{R}^{p_i}$. На каждый узел a_i , $i=1, \dots, n$ в текущий момент времени t подается векторное управляющее (входное) воздействие $V[t, a_i] = V[t, i] \in \mathbf{R}^{m_i}$. Множества состояний и управляющих воздействий для узла a_i обозначим соответственно X_i и V_i .

Время является дискретной величиной с шагом $\Delta t = 1$, начальный момент времени функционирования модели $t_0 = 0$. Начальное состояние модели $X[0] = (X[0, 1], \dots, X[0, n])$.

Связи между узлами задаются двумя матрицами смежности по состояниям S_x и по

управляющим воздействиям S_v . Структуру окрестностной модели можно также представить в виде ориентированного графа с двумя видами дуг (по состояниям и управляющим воздействиям), который назовем графом структуры окрестностной модели.

Далее все рассуждения и расчеты будем проводить относительно произвольно выбранного узла окрестностной модели a_i , $i=1, \dots, n$. Для остальных узлов приведенные ниже формулы задаются аналогично.

Под воздействием функции пересчета состояний $G_i : X_{O_x[a_i]} \times V_{O_v[a_i]} \rightarrow X_i$ узел a_i в следующий момент времени $t+1$ переходит в состояние $X[t+1, i] \in R^{p_i}$, где $O_x[a_i] \subseteq A$ и $O_v[a_i] \subseteq A$ – множества узлов, входящих в окрестность узла a_i , или окрестности узла a_i по состояниям и управляющим воздействиям соответственно; $X_{O_x[a_i]}$, $V_{O_v[a_i]}$ – множества состояний и управляющих воздействий в текущий момент времени соответственно для перечисленных выше множеств узлов.

Сначала рассмотрим случай, когда граф структуры окрестностной модели является полным по состояниям и управляющим воздействиям, то есть $O_x[a_i] = O_v[a_i] = A$, $i=1, \dots, n$.

Тогда функция G_i переводит вектор $(X^T[t, 1], \dots, X^T[t, n], V^T[t, 1], \dots, V^T[t, n])^T$ в $X[t+1, i]$ и имеет вид:

$$\begin{aligned} X[t+1, i] = \\ = G_i(X[t, 1], \dots, X[t, n], V[t, 1], \dots, V[t, n]) \end{aligned} \quad (1)$$

Если граф структуры не полный и заданы окрестности $O_x[a_i]$, $O_v[a_i]$, тогда функцию G_i в (1) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} X[t+1, i] = \\ = G_i(X[t, i_1^x], \dots, X[t, i_d^x], V[t, i_1^v], \dots, V[t, i_l^v]) \end{aligned} \quad (2)$$

где $X[t, i_k^x]$ – состояние в узле $a_{i_k^x}$ в момент времени t ; $a_{i_k^x} \in O_x[a_i]$ – узел, входящий в окрестность узла a_i по состоянию, $k=1, \dots, d$; $V[t, i_p^v]$ – управляющее воздействие на узел $a_{i_p^v}$ в момент времени t ; $a_{i_p^v} \in O_v[a_i]$ – узел, входящий в окрестность a_i по управляющему воздействию, $p=1, \dots, l$.

Функция G_i в общем случае может быть линейной, полиномиальной или нелинейной. Далее будем рассматривать динамические

окрестностные модели с линейными функциями пересчета состояний. В линейном случае формула (2) примет вид:

$$\begin{aligned} X[t+1, i] = \sum_{a_j \in O_x[a_i]} g_x[i, j] X[t, j] + \\ + \sum_{a_k \in O_v[a_i]} g_v[i, k] V[t, k] + g_c[i], \end{aligned} \quad (3)$$

где $j, k=1, \dots, n$; $g_x[i, j] \in R^{p_i \times p_j}$, $g_v[i, k] \in R^{p_i \times m_k}$, $g_c[i] \in R^{p_i \times 1}$ – матрицы-параметры.

Пример динамической окрестностной модели с двумя узлами

Приведем пример окрестностной модели, состоящей из двух узлов $A = \{a_1, a_2\}$. Пусть векторы состояний и управляющих воздействий имеют единичную размерность, т.е. $p_i=1$, $m_i=1$, $(i=1, 2)$.

Рассмотрим граф структуры окрестностной модели, представленный на рис. 1.

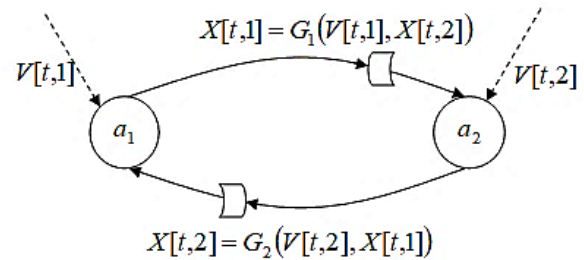


Рис. 1. Граф структуры окрестностной модели с двумя узлами

На рис. 1 символ $\square$ – задержка на один такт функционирования модели.

Тогда окрестности по состояниям и управляющим воздействиям для каждого узла имеют вид: $O_x[a_1] = \{a_2\}$; $O_x[a_2] = \{a_1\}$; $O_v[a_1] = \{a_1\}$; $O_v[a_2] = \{a_2\}$, т.е. состояние $X[t+1, 1]$ узла a_1 в момент времени $t+1$ зависит от состояния $X[t, 2]$ узла a_2 и управления $V[t, 1]$ в узле a_1 в текущий момент времени t , а состояние $X[t+2, 2]$ узла a_2 – от $X[t, 1]$ и $V[t, 2]$.

Матрицы смежности по состояниям S_x и по управляющим воздействиям S_v соответственно равны:

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; S_v = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для рассматриваемого примера функции пересчета состояний в общем случае задаются уравнениями:

$$\begin{cases} X[t+1,1] = G_1(X[t,2], V[t,1]); \\ X[t+1,2] = G_2(X[t,1], V[t,2]). \end{cases} \quad (4)$$

Если функции пересчета состояний G_i линейны, то система (4) с учетом (3) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} X[t+1,1] = g_x[1,2]X[t,2] + \\ + g_v[1,1]V[t,1] + g_c[1]; \\ X[t+1,2] = g_x[2,1]X[t,1] + \\ + g_v[2,2]V[t,2] + g_c[2]. \end{cases} \quad (5)$$

Динамическая окрестностная модель с нечеткой иерархической структурой

В [9-10] рассмотрена параметрическая идентификация, т.е. нахождение параметров функций пересчета состояний G_i ($i=1, \dots, n$) линейной окрестностной модели с использованием псевдообращения.

Для повышения точности моделирования, по сравнению с указанным выше способом, предлагается использование двухуровневой [11] нечеткой динамической окрестностной модели, каждый узел первого уровня которой нечетко связан с входящими в него узлами второго уровня. Данную модель далее будем называть динамической окрестностной моделью с нечеткой иерархической структурой.

Пусть для каждого узла $a_i \in A$ окрестностной модели определено множество узлов второго уровня $A_i = \{a_i^1, \dots, a_i^c\}$. При этом $a_i^r \in a_i$ ($r=1, \dots, c$) с некоторой функцией принадлежности $W_i^r : X_{O_x[a_i]} \times V_{O_v[a_i]} \rightarrow \mathbf{R}_{[0,1]}$, значения которой зависят от состояний и управляющих воздействий на узел a_i в текущий момент времени:

$$W_i^r[t] = W_i^r(X[t, i_1^x], \dots, X[t, i_d^x], V[t, i_1^v], \dots, V[t, i_l^v]) \quad (6)$$

Таким образом, каждый узел $a_i \in A$ окрестностной модели является, в свою очередь, нечеткой окрестностной моделью с множеством узлов второго уровня $A_i = \{a_i^1, \dots, a_i^c\}$.

Если значение функции принадлежности $W_i^r[t]$ в текущий момент времени меньше некоторого заданного порога $0 < \delta < 1$, т.е. $W_i^r[t] < \delta$, то будем считать, что влияние узла

a_i^r на узел a_i несущественно и положим $W_i^r[t] = 0$, т.е. $a_i^r \notin O_x[a_i]$, $a_i^r \notin O_v[a_i]$ в момент времени t .

Для каждого узла второго уровня $a_i^r \in A_i$ определим функцию G_i^r :

$$X[t+1, i, r] = G_i^r(X[t, i_1^x], \dots, X[t, i_d^x], V[t, i_1^v], \dots, V[t, i_l^v]), W_i^r[t] \neq 0, \quad (7)$$

при $W_i^r[t] = 0$ положим $X[t+1, i, r] = 0$.

В линейном случае (7) имеет вид:

$$\begin{aligned} X[t+1, i, r] = & \sum_{a_j \in O_x[a_i^r]} g_x[i, r, j] X[t, j] + \\ & + \sum_{a_k \in O_v[a_i^r]} g_v[i, r, k] V[t, k] + g_c[i, r], \end{aligned} \quad (8)$$

где $O_x[a_i^r]$ – окрестность узла a_i^r по x ; $O_v[a_i^r]$ – окрестность узла a_i^r по v ; $g_x[i, r, j] \in R^{p_i \times p_j}$, $g_v[i, r, k] \in R^{p_i \times m_k}$, $g_c[i, r] \in R^{p_i \times 1}$ – матрицы-параметры.

Функция пересчета состояний G_i для узла первого уровня $a_i \in A$ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} X[t+1, i] = & G_i(X[t, i_1^x], \dots, X[t, i_d^x], \\ & V[t, i_1^v], \dots, V[t, i_l^v]) = \frac{\sum_{r=1}^c W_i^r[t] G_i^r[t]}{\sum_{r=1}^c W_i^r[t]}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $G_i^r[t] = G_i^r(X[t, i_1^x], \dots, X[t, i_d^x], V[t, i_1^v], \dots, V[t, i_l^v])$.

Нечеткая структурная и параметрическая идентификация модели

Приведем алгоритм нечеткой структурной и параметрической идентификации [12] двухуровневой окрестностной модели. Здесь, как и ранее, все рассуждения будем проводить относительно произвольно выбранного узла a_i , $i=1, \dots, n$.

1. Пусть для рассматриваемой окрестностной модели известно M наблюдений всех $X[t, i]$, $V[t, i]$ в некоторый текущий момент времени t и $X[t+1, i]$ в следующий момент времени $t+1$. Требуется найти параметры функции G_i .

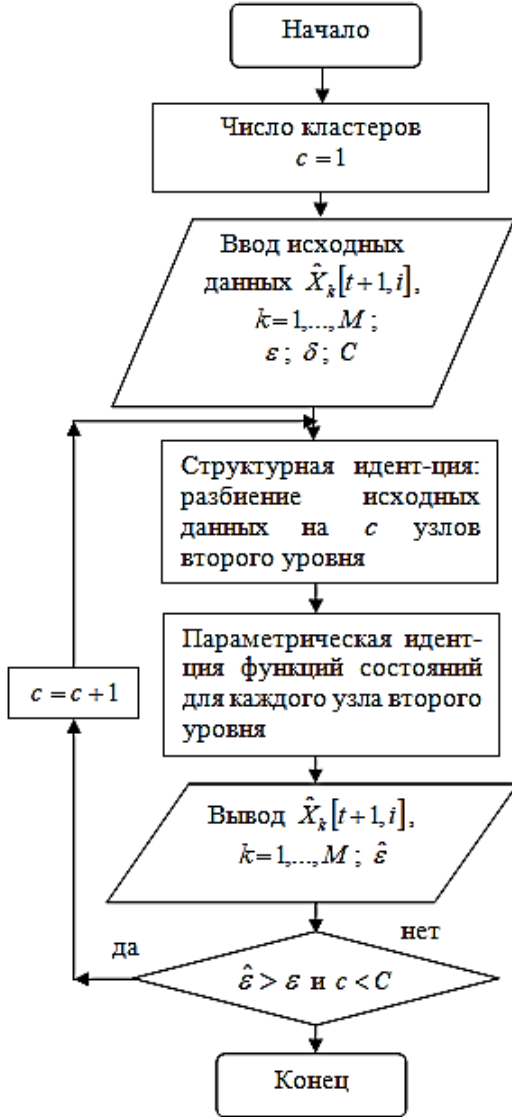


Рис. 2. Блок-схема алгоритма структурной и параметрической идентификации модели

2. Рассмотрим обучающее множество $H = \{H_1, \dots, H_M\}$, состоящее из M наборов исходных данных

$$H_k = (X_k^T[t, i_1^x], \dots, X_k^T[t, i_d^x], V_k^T[t, i_1^v], \dots, V_k^T[t, i_l^v])^T, \quad k = 1, \dots, M.$$

3. Пусть количество узлов второго уровня узла a_i равно $c = 1$. Зададим предельную среднюю квадратическую ошибку идентификации $\varepsilon > 0$ и порог принадлежности $0 < \delta < 1$. Зададим максимальное количество узлов второго уровня C .

4. Будем считать, что в узел a_i окрестностной модели входит c узлов второго уровня $A_i = \{a_i^1, \dots, a_i^c\}$. Определим функцию принадлежности $W_i^r[t]$ для каждого a_i^r , $r = 1, \dots, c$. Для этого разобьем множество H методом нечет-

ких c -средних на кластеры [12-14], которым сопоставим узлы второго уровня a_i^r .

Каждый набор $H_k \in a_i^r$ с некоторой степенью принадлежности $w_i^{kr} = W_i^r(H_k) \in [0, 1]$, вычисляемой по формуле (6). Если степень принадлежности w_i^{kr} набора H_k достаточно мала, т.е. $w_i^{kr} < \delta$, то будем считать, что его влияние на узел a_i^r несущественно, и положим $w_i^{kr} = 0$.

5. Для каждого узла второго уровня $a_i^r \in A_i$ определим параметры функции G_i^r из (8) с помощью псевдообращения [9].

Введем следующие блочные матрицы:

$$X_i^r = \begin{bmatrix} X_1^T[t, i_1^x] \dots X_1^T[t, i_d^x] V_1^T[t, i_1^v] \dots V_1^T[t, i_l^v] 1 \\ X_2^T[t, i_1^x] \dots X_2^T[t, i_d^x] V_2^T[t, i_1^v] \dots V_2^T[t, i_l^v] 1 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ X_M^T[t, i_1^x] \dots X_M^T[t, i_d^x] V_M^T[t, i_1^v] \dots V_M^T[t, i_l^v] 1 \end{bmatrix};$$

$$L_i^r = [g_x^T[i, r, i_1^x] \dots g_x^T[i, r, i_d^x] g_v^T[i, r, i_1^v] \dots g_v^T[i, r, i_l^v] g_c^T[i, r]]^T;$$

$$B_i^r = [X_1^T[t+1, i] X_2^T[t+1, i] \dots X_M^T[t+1, i]]^T,$$

где $g_x[i, r, i_k^x]$, $k = 1, \dots, d$, $g_v[i, r, i_p^v]$, $p = 1, \dots, l$, $g_c[i, r]$ – неизвестные матрицы-параметры.

В этих обозначениях для решения задачи параметрической идентификации, т.е. нахождения матрицы L_i^r , необходимо решить систему линейных уравнений:

$$X_i^r \cdot L_i^r = B_i^r. \quad (10)$$

Критерий параметрической идентификации имеет вид: $\|X_i^r \cdot L_i^r - B_i^r\| \rightarrow \min$, для его выполнения необходимо найти нормальное псевдорешение (10): $L_i^r = (X_i^r)^+ \cdot B_i^r$, где $(X_i^r)^+$ – псевдообратная матрица к X_i^r .

Заметим, что для параметрической идентификации функции (8) используются только те наборы H_k , для которых $w_i^{kr} \neq 0$.

6. Функция G_i (9) будет иметь вид:

$$\hat{X}_k[t+1, i] = G_i(H_k) = \frac{\sum_{r=1}^c w_i^{kr} G_i^r}{\sum_{r=1}^c w_i^{kr}}, \quad (11)$$

где $\hat{X}_k[t+1, i]$ – модельное состояние в момент времени $t+1$ для набора данных H_k .

7. Вычислим среднюю квадратическую ошибку идентификации по формуле:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \|X_k[t+1, i] - \hat{X}_k[t+1, i]\|^2.$$

8. Если $\hat{\varepsilon} > \varepsilon$ и $c < C$, то $c = c + 1$. Перейти к шагу 4. Иначе конец алгоритма.

Блок-схема алгоритма нечеткой структурной и параметрической идентификации для узла a_i модели приведена на рис. 2.

Пример структурной и параметрической идентификации линейной иерархической окрестностной модели

Рассмотрим пример окрестностной модели, состоящей из двух узлов первого уровня

$A = \{a_1, a_2\}$, граф структуры которой приведен на рис. 1. Мощность обучающего множества $|H| = 500$.

После проведения анализа исходных данных и структурной идентификации иерархической окрестностной модели было выделено по 4 узла второго уровня в узлах a_1 и a_2 . Таким образом, $A_i = \{a_i^1, a_i^2, a_i^3, a_i^4\}$, $i = 1, 2$.

Граф структуры рассматриваемой модели приведен на рис. 3.

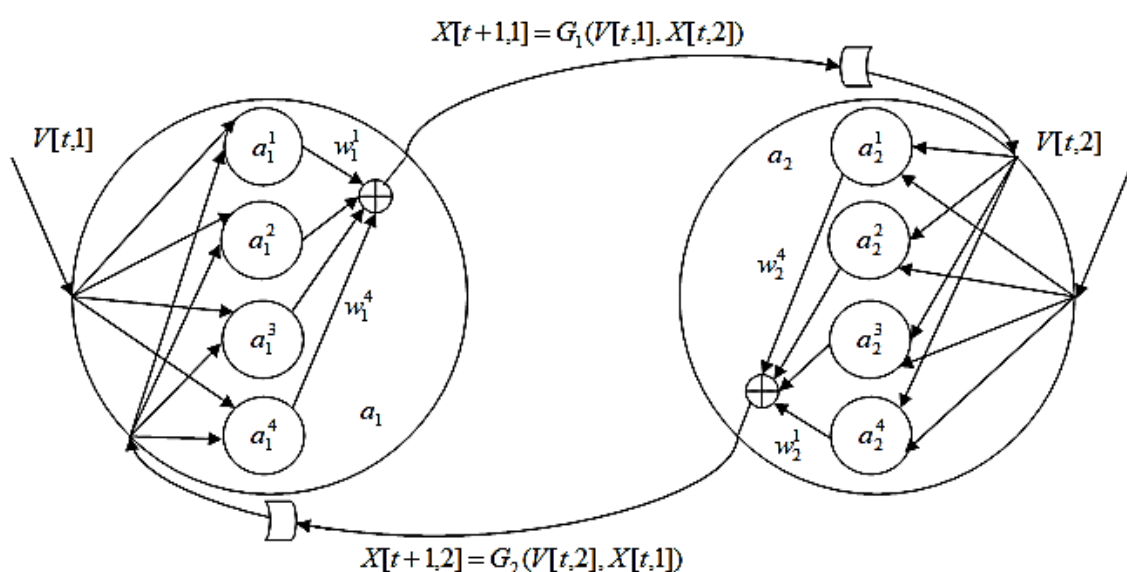


Рис. 3. Пример нечеткой иерархической окрестностной модели

Для каждого узла второго уровня $a_i^r \in A_i$ функция (7) имеет вид:

$$X[t+1,1,r] = G_1^r(X[t,2], V[t,1]), \quad (12)$$

для узлов $a_2^r \in A_2$:

$$X[t+1,2,r] = G_2^r(X[t,1], V[t,2]), \quad (13)$$

где $r = 1, \dots, 4$.

Запишем уравнения (12)-(13) для всех узлов второго уровня a_i^r в виде системы из 8-ми уравнений вида (8):

$$\begin{cases} X[t+1,1,1] = g_x[1,1,2]X[t,2] + \\ + g_v[1,1,1]V[t,1] + g_c[1,1]; \\ \dots \\ X[t+1,1,4] = g_x[1,4,2]X[t,2] + \\ + g_v[1,4,1]V[t,1] + g_c[1,4]; \\ X[t+1,2,1] = g_x[2,1,1]X[t,1] + \\ + g_v[2,1,2]V[t,2] + g_c[2,1]; \\ \dots \\ X[t+1,2,4] = g_x[2,4,1]X[t,1] + \\ + g_v[2,4,2]V[t,2] + g_c[2,4], \end{cases}$$

т.е. каждое уравнение системы (5) распадается на 4 уравнения для каждого узла второго уровня.

Тогда (9) будут иметь вид:

$$X[t+1,1] = G_1(X[t,2], V[t,1]) =$$

$$= \frac{\sum_{r=1}^4 W_1^r(X[t,2], V[t,1]) \cdot G_1^r(X[t,2], V[t,1])}{\sum_{r=1}^4 W_1^r(X[t,2], V[t,1])},$$

$$X[t+1,2] = G_2(X[t,1], V[t,2]) =$$

$$= \frac{\sum_{r=1}^4 W_2^r(X[t,1], V[t,2]) \cdot G_2^r(X[t,1], V[t,2])}{\sum_{r=1}^4 W_2^r(X[t,1], V[t,2])}.$$

Средняя квадратическая ошибка идентификации рассмотренной линейной иерархической окрестностной модели $\hat{\varepsilon}=0,36$. Обычная линейная окрестностная модель на том же наборе исходных данных дает ошибку $\hat{\varepsilon}=3,17$. Таким образом, введение нечеткой иерархической структуры значительно улучшает адекватность окрестностной модели.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрены линейные динамические окрестностные модели с нечеткой иерархической структурой. Приведен алгоритм и пример их структурной и параметрической идентификации. На тестовых данных показано, что введение нечеткой иерархической структуры в несколько раз уменьшает среднюю квадратическую ошибку идентификации и повышает адекватность окрестностной модели.

Решение задач структурной и параметрической идентификации динамических окрестностных моделей с нечеткой иерархической структурой, базирующихся на наблюдаемых результатах работы сложной системы, является удобным и эффективным инструментом для моделирования процессов реального производства, отличающегося сложными механизмами внутренних связей и разнородной структурой.

После проведения идентификации и разработки адекватной окрестностной модели можно решать более общие задачи, например, задачи достижимости, смешанного управления и т.д.

Литература

1. Блюмин С.Л., Шмырин А.М. Окрестностные системы: монография. Липецк: ЛЭГИ, 2005. 132 с.
2. Блюмин С.Л., Шмырин А.М., Шмырина О.А. Билинейные окрестностные системы: монография. Липецк: ЛЭГИ, 2006. 131 с.
3. Shang Y. Multi-agent coordination in directed moving neighborhood random networks // Chinese Physics B. 2010. Vol. 19. № 7. Article ID 070201.
4. Шмырин А.М., Ярцев А.Г., Правильникова В.В. Трилинейная окрестностная модель процесса формирования температуры смотки горячекатаной полосы // Вестник ТГУ. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. Вып. 2. С. 463-469.
5. Parametrical neighborhood modelling of the process of forming the temperature of hot-rolled strip coiling / A.M. Shmyrin [and others] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2016. 51(4). P. 401-404.
6. Study of The Trilinear Neighborhood Model of Process of Formation of Temperature's Coiling Hot-Rolled Strip / A. M. Shmyrin [and others] // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2016. Vol. 6. № 3. P. 1371 – 1374.
7. Седых И.А. Прогнозирование уровня подземных вод месторождения цементного сырья на основе динамических окрестностных моделей // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. № 3. С. 326-332.
8. Седых И.А. Управление динамическими окрестностными моделями с переменными окрестностями // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 1(71). С. 18-23.
9. Седых И.А. Параметрическая идентификация линейной динамической окрестностной модели // Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2016. С.12-19.
10. Мишачев Н.М., Шмырин А.М. Окрестностные структуры и метаструктурная идентификация // Таврический вестник информатики и математики. 2017. Т. 37. № 4. С. 87-95.
11. Седых И.А. Двухуровневые полиномиальные динамические окрестностные модели с переменными окрестностями и их параметрическая идентификация // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2018. № 1(51). С. 57-65.
12. Ходашинский И.А. Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы // Проблемы управления. 2009. № 4. С. 15-23.
13. Li Y., Shang Y., Yang Y. Clustering coefficients of large networks // Information Sciences. 2017. Vol. 382-383. P. 350-358.
14. Scaled cluster consensus of discrete-time multi-agent systems with general directed topologies / B. Hou [and others] // Int. J. Control. 2016. № 47. P. 3839–3845.

Поступила 20.05.2019; принята к публикации 31.07.2019

Информация об авторах

Седых Ирина Александровна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398000, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: sedykh-irina@yandex.ru

IDENTIFICATION OF LINEAR DYNAMIC NEIGHBORHOOD MODELS WITH FUZZY HIERARCHICAL STRUCTURE

I.A. Sedykh

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: neighborhood models and their modifications are used to model various distributed systems and processes. The paper gives a definition of a non-hierarchical dynamic neighborhood model with vector inputs and states, which functions in discrete time. The equations of the functions of the recalculation of states in the cases of a complete and incomplete structure graph are given. A general view of the linear recalculation function of states is shown. An example of a two-node dynamic neighborhood model is considered, for which a graph of the structure, the adjacency matrix, and the equation for recalculating states in the general and linear cases is given. The concept of a two-level fuzzy dynamic neighborhood model with a fuzzy hierarchical structure, each node of the first level of which is fuzzy connected with the nodes of the second level included in it, is given. The algorithm of fuzzy structural and parametric identification of a two-level neighborhood model is considered; its block diagram is shown. An example of the structural and parametric identification of a linear dynamic neighborhood model with a fuzzy hierarchical structure is given. It is shown that for the considered source data, the introduction of a fuzzy hierarchical structure several times reduces the mean square error of identification and significantly improves the adequacy of the neighborhood model

Key words: linear dynamic neighborhood models, hierarchy, fuzzy structure, structural and parametric identification

Acknowledgment: The work was supported by the Russian Fund for Fundamental Research (project no. 19-48-480007 r_a)

References

1. Blumin S.L., Shmyrin A.M. "Neighborhood systems" ("Okrestnostnye sistemy"), monograph, Lipetsk, LEGI, 2005, 132 p.
2. Blumin S.L., Shmyrin A.M., Shmyrin O.A. "Bilinear neighborhood systems" ("Bilineynye okrestnostnye sistemy"), monograph, Lipetsk, LEGI, 2006, 131 p.
3. Shang Y. "Multi-agent coordination in moving neighborhood random networks", *Chinese Physics B*, 2010, vol. 19, no. 7, article ID 070201.
4. Shmyrin A.M., Yartsev A.G., Pravilnikova V.V. "Trilinear neighborhood model of the process of forming the temperature of the hot-rolled strip coiling", *Bulletin of TSU. Series: Natural and Technical Sciences (Vestnik TGU. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki)*, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 463-469.
5. Shmyrin A.M. et al. "Parametrical neighborhood of the hot rolled strip coiling", *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2016, no. 51 (4), pp. 401-404.
6. Shmyrin A.M. et al. "Study of the trilinear neighborhood model of process of formation of temperature's coiling hot-rolled strip", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 1371-1374.
7. Sedykh I.A. "Predicting the level of groundwater deposits of cement raw materials based on dynamic neighborhood models", *Bulletin of Don State Technical University (Vestnik Donskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2018, no.3, pp. 326-332.
8. Sedykh I.A. "Control of dynamic neighborhood models with variable neighborhoods", *Control Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2018, no. 1 (71), pp. 18-23.
9. Sedykh I.A. "Parametric identification of a linear dynamic neighborhood model", *Proc. of the International Scientific and Practical Conference "Innovative Science: Past, Present, Future" (Innovatsionnaya nauka: proshloe, nastoyashchee, budushchee: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Ufa, 2016, pp.12-19.
10. Mishachev N.M., Shmyrin A.M. "Neighborhood structures and metastructural identification", *Tavrchesky Bulletin of Informatics and Mathematics (Tavrcheskiy vestnik informatiki i matematiki)*, 2017, vol. 37, no. 4, pp.87-95.
11. Sedykh I.A. "Two-level polynomial dynamic neighborhood models with variable neighborhoods and their parametric identification", *News of Higher Educational Institutions of the Black Earth Region (Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya)*, 2018, no. 1 (51), pp. 57-65.
12. Khodashinskiy I.A. "Identification of fuzzy systems: methods and algorithms", *Control Problems (Problemy upravleniya)*, 2009, no. 4, pp. 15-23.
13. Li Y., Shang Y., Yang Y. "Clustering coefficients of large networks", *Information Sciences*, 2017, vol. 382-383, pp. 350-358.
14. Hou B. et al. "Scaled cluster of multi-agent systems", *Int. J. Control*, 2016, no. 47, pp. 3839-3845.

Submitted 20.05.2019; revised 31.07.2019

Information about the author

Irina A. Sedykh, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya st., Lipetsk 398000, Russia), e-mail: sedykh-irina@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ СКВОЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ЦИФРОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А.В. Бредихин¹, М.В. Кузнецов^{1,2}, Ю.М. Школьников¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество», г. Воронеж, Россия

Аннотация: одним из важнейших факторов, определяющим успешную производственную деятельность компании в конкурентных условиях, является использование промышленных информационных технологий, обеспечивающих автоматизированное взаимодействие между объектами технологической подготовки производства и позволяющих управлять разработкой технологических процессов в единой информационной среде предприятия. Внедрение данных программных средств позволяет организовать совместную и параллельную технологическую подготовку производства, сократив время на согласование инженерных решений и повысить актуальность технической информации. Описывается процесс разработки методики формирования сквозного технологического процесса механической обработки с использованием PLM системы Teamcenter. Рассмотрены вопросы редактирования модели данных PLM системы и адаптации ее к отечественным стандартам управления технологической подготовки производства. Используемая в модели данных объектная модель позволяет организовать иерархию информационных объектов с наследованием свойств и поведения бизнес-объектов. Предложенная технологическая платформа позволяет полностью управлять созданием технологического маршрута, а также передавать элементы формируемого технологического процесса на разработку цеховым технологом. Элементами технологического процесса могут быть технологические переделы, цеховые технологические процессы и операции. Все они являются самостоятельными объектами. Разработанное решение позволит сократить время разработки технологических процессов за счет управления совокупности взаимосвязанных технологических данных. Показана возможность учета отраслевых особенностей в процессе кастомизации информационной системы

Ключевые слова: сквозной технологический процесс, PLM, машиностроение

Введение

За последние 10 лет большинство отечественных опытно-конструкторских бюро перешло на проектирование изделий с использованием методологии электронного макета изделия. Данный подход позволяет сократить сроки проектирования за счет обеспечения более тесных взаимосвязей между компонентами изделия, что снижает количество ошибок и повышает качество инженерных данных. Работы по созданию электронного макета изделия выполняются в системах автоматизированного проектирования (CAD). Как правило, процесс проектирования охватывает большое количество исполнителей на разных этапах жизненного цикла изделия. Для управления совместной работой используются системы информационной поддержки жизненного цикла изделия. Данные системы представляют собой платформу единого информационного пространства, которая способна аккумулировать и связать проектные, конструкторские, технологические и эксплуатационные данные об изделии.

Ведущей системой информационной поддержки ЖЦИ на данный момент является PLM система Teamcenter от компании Siemens. Данная система является стандартом для проектирования на отечественных предприятиях авиа- и ракетостроения. Информационное сопровождение изделия на всех этапах жизненного цикла является необходимым условием постановки на производство современного изделия.

Конкурентоспособность продукции обусловливается не только за счет соответствия проектируемого изделия требованиям и ожиданиям потребителя, но и снижением его себестоимости. Снижение затрат возможно при оптимизации процессов технической подготовки производства, обеспечения сквозной технологической подготовки и учета материальных затрат на уровне производства.

Постановка задачи

В части технологической подготовки производства решается круг задач, связанный определением методов и стратегии организации производственных процессов, подбором и разработкой технических средств производства. На данном этапе уточняется себестои-

мость изготавливаемого изделия, перечень необходимых ресурсов и план производства [1].

Информационные элементы технологического процесса определяются его этапами, а именно:

разработка маршрутной технологии, определение последовательности выполнения основных операций и закрепление их в цехах за конкретными группами оборудования;

выбор инструмента и заказ на проектирование специализированной технологической оснастки, нормирование материала и трудовых норм, установление разряда работ;

разработка операционной технологии, включающей детальное описание указаний к действиям и параметры выполнения каждой операции.

Обработка на технологичность является итерационным процессом, сопровождающимся выпуском изменений в конструкции изделия, а также состава технологического процесса. Управление взаимосвязанными данными об изменениях является необходимым условием качественной подготовки производства. С учетом того, что конструкторские данные выполнены в качестве электронного макета изделия, технологические данные также должны быть представлены в электронном виде. Для обеспечения управляемости конструкторского и технологического состава изделия необходимо обеспечить между ними информационную взаимосвязь[2].

Задача PLM системы организовать технологическую информацию и связанные с ней процессы в единую систему, позволяющую не только актуализировать данные об изделии, но и эффективно ею управлять. Это обеспечивается правильной организацией хранения взаимосвязанной информации.

Реализация

Предлагаемое программное решение представляет собой функционально законченную настройку PLM системы Teamcenter, оформленное в виде набора отдельных файлов в формате xml и ресурсов к ним. Предназначается для расширения модели данных системы через встроенный в установщик Teamcenter для организации информационной возможности внесения и управления технологической информацией в процессе технической подготовки производства изделий. С учётом перехода на безбумажные технологии разработки технической документации, разрабатываемое решение позволит сократить сроки подготовки производства и обеспечить возможность реализации сквозных технологических процессов, что позволит обрабатывать большие массивы данных в кратчайшие сроки, что определяется особенностями машиностроительного производства.

Затраты на доработку и расширение модели данных должны быть минимальными, что определяется правильным подбором технических и программных средств, которые будут использоваться при проектировании и реализации функционала.

Для каждого элемента структуры изделия (деталь, сборочная единица и т.п.) создается технологический маршрут, который является хранилищем всей производственной информации о процессах его изготовления или ремонта.

Любой объект в системе Teamcenter представляет структурированный набор элементов [3].

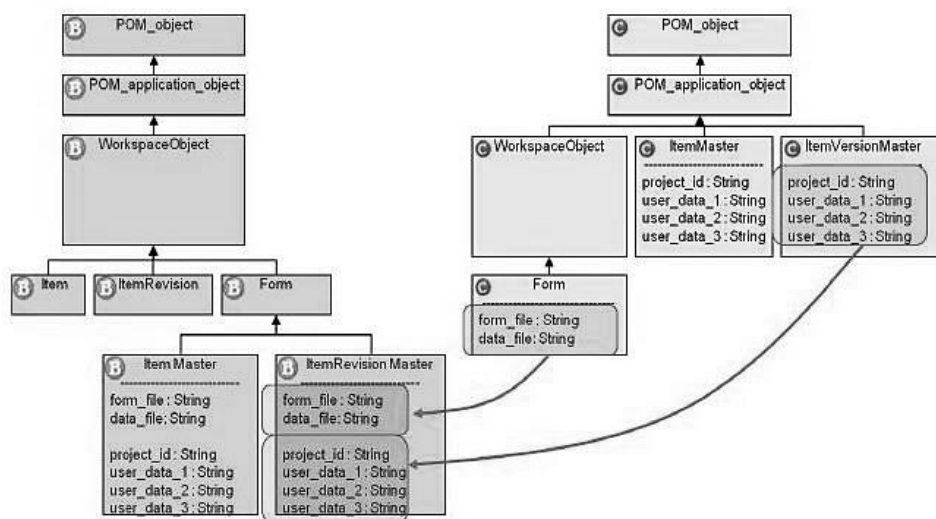


Рис. 1. Схема структуры бизнес-объектов модели данных Teamcenter

Описание классов определяют статическое состояние объекта и основное поведение класса. Подбизнес – объекты – дополнительные бизнес-объекты, которые отображены на том же POM class как родительский бизнес-объект и имеют то же поведение как родительский бизнес-объект. Эти дополнительные бизнес-объекты должны использовать другое имя и считаются подбизнес-объектами или специализациями POM class и основного бизнес-объекта. Можно определить бизнес-объект

иерархическим способом. Автоматическая иерархия основных бизнес-объектов сгенерирована для подклассов каждого POM_object [4].

В разрабатываемом решении был создан ряд дополнительных информационных объектов, определены их свойства и методы. На рис. 2 показана схема структуры бизнес-объектов Item дерева POM, включающая проектируемые кастомизации [5].

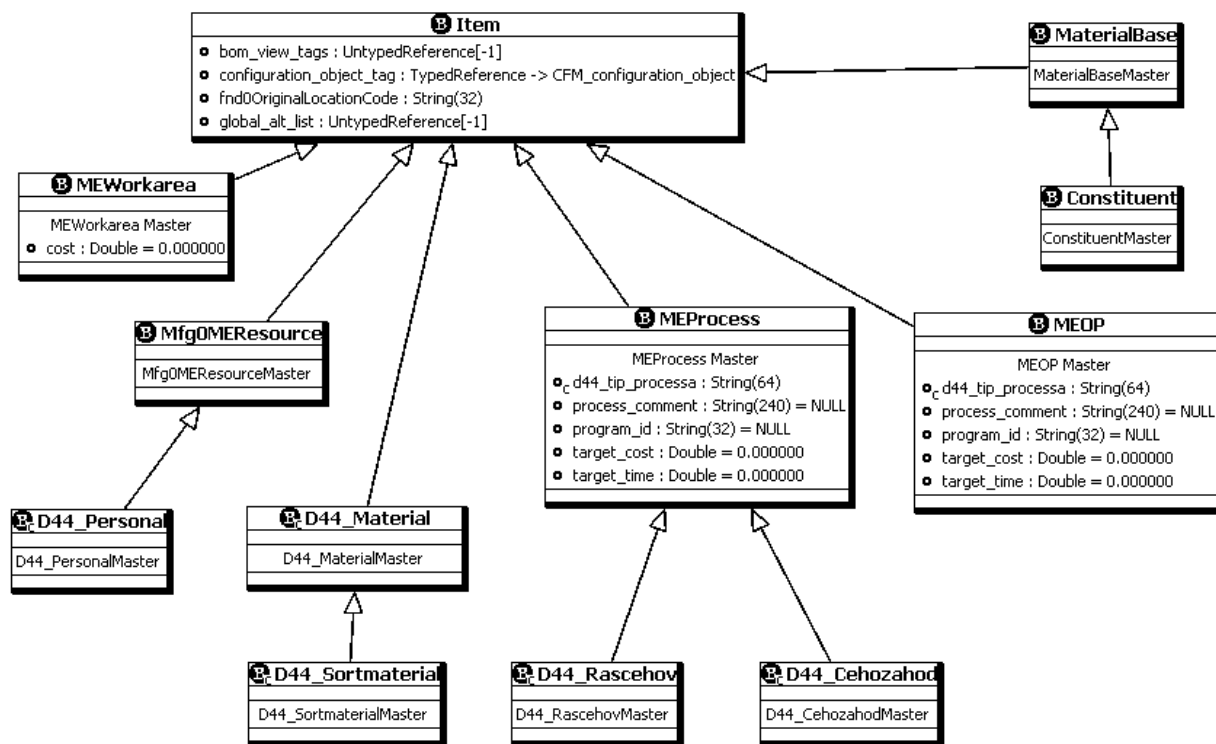


Рис. 2. Фрагмент UML диаграммы кастомизированных объектов

После загрузки кастомизаций расширения базовой модели данных в интерфейсе клиента Teamcenter будут доступны для работы пользователя в задачах создания технологических процессов изготовления изделий.

Заключение

Предложенная технологическая платформа позволяет полностью управлять формированием расцеховочного процесса, а также передавать элементы формируемого технологического процесса на разработку технологам разных цехов. Элементами технологического процесса могут быть технологические переделы, цеховые технологические процессы и операции. Все они являются самостоятельными объектами. В результате можно создать

сквозной технологический процесс, включив в него технологические переделы, цеховые технологические процессы и операции. Таким образом, можно осуществлять сквозное параллельное проектирование технологического процесса. В системе Teamcenter имеется возможность автоматизации процессов, включая использование механизма подписи отдельных операций ответственными сотрудниками с выводом в отчетные документы [6].

В приложении разработки технологических процессов с использованием кастомизированных объектов имеется возможность построения структуры технологического процесса и определения связей между объектами. На рис. 3 показан пример реализации в системе Teamcenter.

2720.01140.07975/00;1-Механическая обработка (Состав)	
020204013/00;1-Пруток АК6.КР200	
R.2720.01140.07975/00;1-Расцеховка (Состав)	
005.2720.01140.07875/00;1-Цехозаход (Состав)	Цех 37
010.2720.01140.07875/00;1-Цехозаход (Состав)	Цех 15
O_010.2720.01140.07875/00;1-Разметка1 (Состав)	Нанесение осевых разметка
O21-3П/00;1-Очки 3П x 1	Очки 3П ГОСТ 12.4.003-80
УШ-1-250/00;1-Угольник x 1	Угольник УШ-1-250 ГОСТ 374
М-С15/00;1-Молоток x 1	Молоток Ц15.хр ГОСТ 2310-7
7840-0005/00;1-Чертилка x 1	Чертилка 7840-0005 ГОСТ 24
7841-0021/00;1-Циркуль x 1	Циркуль разметочный Х9 784
7843-0035/00;1-Кернер x 1	Кернер хим окс при ГОСТ 721
ШР-400-005/00;1-Штангенциркуль x 1	Штангенциркуль ШР-400-0.0
Л-300/00;1-Линейка x 1	Линейка-300 ГОСТ 427-75
zag.2122G-31-050/00;1 x 67	zag.2122G-31-050
015_2122G-31-050/A;1-Разметка	015_2122G-31-050
2-1-16-10/00;1-Плита	2-1-16-10 Плита
ИОТ_86/00;1-ИОТ № 86	Инструкция по охране труда
P234/00;1-Фрезеровщик x 32	Фрезеровщик 3 разряда

Рис. 3. Состав технологического процесса

Анализ совокупной информации, представленной в бумажном виде и в электронном виде, показал адекватность разработанного решения, что говорит о возможности его использования в задачах разработки технологических процессов в электронном виде.

Таким образом, предприятие имеет возможность в кратчайшие сроки приступить к реализации проектов внедрения PLM технологий за счет использования преднастроенного решения и обеспечить переход на новый технологический уровень подготовки производства.

Литература

1. Экономика производства // Самзан. Режим доступа: <http://samzan.ru/128678> (дата обращения: 02.03.2018).
2. Методы процессов технологической подготовки

производства // iFreeStore. Режим доступа: <http://ifreestore.net/5519/> (дата обращения: 02.03.2018).

3. Чижов М.И., Скрипченко Ю.С., Гусев П.Ю. Моделирование технологических процессов в tescnomatix Plant Simulation // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 12-2. С. 4-5.

4. Рыжков В.А., Юров А.Н., Филимонова А.А. Создание кроссплатформенного программного комплекса визуализации PLM данных // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XV междунар. науч.-метод. конф. Воронеж: ВГУ, 2015. С. 370-373.

5. Стародубцев П.Г., Ветохин В.В. Верификатор управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XVI Междунар. науч.-метод. конф.; под ред. Н.А. Тюкачева, 2016. С. 420-422.

6. Создание электронного архива в корпоративной информационной системе на базе 1с: PDM / А.М. Нужный, С.Л. Подвальный, В.Ф. Барабанов, В.В. Сафронов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4-3. С. 655-662.

Информация об авторах

Бредихин Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: maypochta@yandex.ru

Кузнецов Максим Вячеславович – главный технолог, ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ogt@vmail.ru

Школьников Юлиа Михайловна – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: chjulia@list.ru

Поступила 06.06.2019; принята к публикации 05.08.2019

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF FORMING THE END-TO-END TECHNOLOGICAL PROCESS IN DIGITAL PRODUCTION

A.V. Bredikhin¹, M.V. Kuznetsov², Yu.M. Shkol'nikova¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²PJSC Voronezh Joint-Stock Aircraft Building Society, Voronezh, Russia

Abstract: one of the most important factors determining the successful production activity of a company in competitive conditions is the use of industrial information technologies that provide automated interaction between the objects of technological preparation of production and allow controlling the development of technological processes in a single information environment of the enterprise. The introduction of these software tools allows one to organize joint and parallel technological preparation of production, reducing the time for reconciling engineering solutions and increasing the relevance of technical information. This article describes the process of developing a technique for forming an end-to-end mechanical processing using the PLM system Teamcenter. The issues of editing the PLM data model of the system and its adaptation to the domestic standards of management of technological preparation of production are considered. The object model used in the data model allows one to organize a hierarchy of information objects with inheritance of properties and behavior of business objects. The proposed technology platform allows one to fully manage the creation of the route, as well as transfer the elements of the technological process to be developed by technologists from different workshops. Technological redistribution, shop technological processes and operations can be elements of the technological process. All of them are independent objects. The developed solution will allow one to reduce the time of development of technological processes due to the controlling a set of interrelated technological data. The possibility of taking into account industry peculiarities in the process of customization of the information system is shown

Key words: end-to-end technological process, PLM, mechanical engineering

References

1. "The economics of production" ("Ekonomika proizvodstva"), Samzan, available at: <http://samzan.ru/128678>
2. "Methods of processes of technological preparation of production" ("Metody protsessov tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva"), iFreeStore, available at: <http://ifreestore.net/5519/>
3. Chizhov M.I., Skripchenko Yu.S., Gusev P.Yu. "Modeling of technological processes in tecnomatix Plant Simulation", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 12-2, pp. 4-5
4. Ryzhkov V.A., Yurov A.N., Filimonova A.A. "Creation of a cross-platform visualization software for PLM data", *Informatics: Problems, Methodology, Technologies, Materials of the XV International Scientific and Methodological Conference (Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii: materialy XV mezhdunar. nauch.-metod. konf.)*, Voronezh State University, 2015, pp. 370-373.
5. Starodubtsev P.G., Vetokhin V.V. "Verifier of control programs for equipment with numerical program control", *Informatics: Problems, Methodology, Technologies, Materials of the XVI International Scientific and Methodological Conference (Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii: materialy XVI mezhdunar. nauch.-metod. konf.)*, 2016, pp. 420-422.
6. Nuzhnyy A.M., Podvalnyy S.L., Barabanov V.F., Safronov V.V. "Creation of an electronic archive in a corporate information system based on 1c: PDM", *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk)*, 2016, vol. 18, no. 4-3, pp. 655-662.

Submitted 06.06.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Aleksey V. Bredikhin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: maypochta@yandex.ru

Maksim V. Kuznetsov, Chief Technologist, PJSC "Voronezh Joint-Stock Aircraft Building Company" (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), Graduate student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ogt@vmail.ru

Yuliya M. Shkol'nikova, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: chjulia@list.ru

ЦЕЛЕВАЯ АРХИТЕКТУРА ГИБРИДНОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО ХРАНИЛИЩА ДАННЫХ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

С.Л. Подвальный, В.Ф. Барабанов, Ф.Г. Логинов, С.А. Коваленко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается проектирование решения для сбора, хранения, real-time обработки и анализа Big Data (больших данных) для одной из ведущих российских мультимедийных продуктовых розничных компаний, работающих как в сфере прямых розничных продаж, так и в сфере электронной коммерции. Объектами исследования являются предъявляемые заказчиком требования к системе; существующая IT-архитектура заказчика, включающая различные системы-источники данных, хранилище данных, системы бизнес-аналитики и визуализации данных; лучшие практики построения масштабируемых высоконагруженных систем обработки и анализа данных; целевая архитектура проектируемого корпоративного хранилища данных. Актуальность разработки решения определяется тем, что в настоящее время происходит постоянный рост объема данных, обработка и анализ которых посредством использования традиционных методов анализа данных трудноосуществима или же неосуществима вообще. В связи с чем наиболее востребованным направлением развития становится разработка хранилища данных гибридной архитектуры, включающей в себя компоненты классического Business Intelligence, Big Data, а также инструменты виртуализации данных, позволяющие объединить данные компоненты в рамках единой системы. Описан сбор и анализ требований к системе, проведенный при разработке системы, приведен анализ платформ Big Data, описаны критерии представленных на рынке систем массово-параллельной обработки и обоснован выбор платформы, рассмотрены решения для предоставления бесшовного доступа к данным и описана имплементация целевой архитектуры гибридного аналитического хранилища. Представлена архитектура хранилища в нотации UML. Разработанная система отвечает всем требованиям к системам для хранения и анализа больших объемов данных, является горизонтально масштабируемой, отказоустойчивой и высокодоступной. Полученное решение поможет сократить затраты на рабочую силу, а использование в разработке программного обеспечения с открытым исходным кодом позволяет еще больше снизить затраты на разработку и использование программного комплекса

Ключевые слова: хранение данных, гибридная архитектура хранилищ данных, система обработки и анализа данных

Введение

Сегодня как никогда в мире большой популярностью пользуется электронная коммерция. Оборот финансовых средств в сфере прямых продаж составил более 1,3 триллион долларов, между компаниями – 15 триллионов долларов. По результатам аналитиков и экспертов в сфере электронной торговли до 2018 года в странах, которые по уровню экономического развития относятся к странам с переходной экономикой и развивающейся, планировалось, что электронная коммерция займет более 40% от общих показателей торговли [1].

Конкуренция уже сейчас очень высока, а с ростом рынка на 30 – 40% в год [2] она станет еще сильнее. Это признают все участники: как поставщики услуг, так и онлайн-ритейлеры. Конкуренция проявляется в росте числа интернет-магазинов, в разрастании торгового предложения действующих игроков, в росте бюджетов на продвижение и в увеличении скорости запуска новых проектов.

В условиях динамичной внешней среды и ужесточения конкуренции все более значительную роль начинают играть методы и модели экономического анализа, позволяющие оперативно реагировать на возникающие проблемы и имеющиеся возможности. Задачи бизнес-анализа очень непросты, но здесь на помощь руководителю приходят современные управленческие концепции и технологии. За долгую историю своего развития теория и практика управления породили целый ряд разнообразных подходов, методов и моделей, нацеленных на повышение эффективности. Эти методы и модели, в свою очередь, обусловили появление и развитие разнообразных аналитических информационных систем [3].

В связи с постоянным ростом данных, которыми приходится оперировать крупным компаниям, в конце 2000-х годов, появилась альтернатива традиционным системам управления базами данных и решениям класса Business Intelligence. Совокупность подходов, инструментов и методов обработки структурированных и неструктурированных данных огромных объемов и значительного многообразия для получе-

ния воспринимаемых человеком результатов стали называть решениями класса Big Data или «Большие данные». На рис. 1 изображен график

динамики запросов «Big Data» и «Business Intelligence» с августа 2010 по август 2016. Данные взяты с сервиса Google Тренды [4].

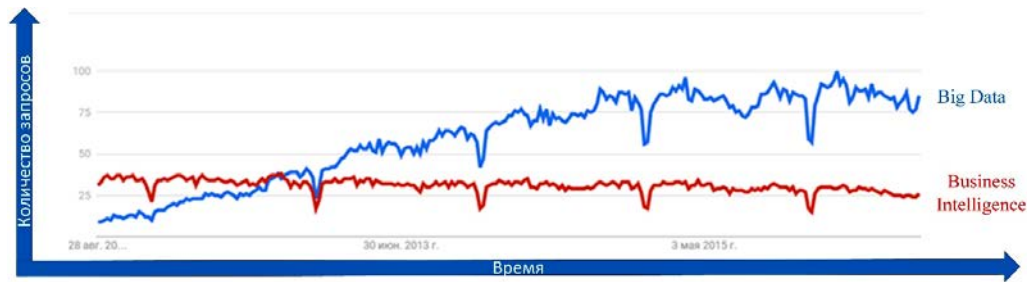


Рис. 1. Динамики запросов «Big Data» и «Business Intelligence»

Сбор анализ и формализация требований к системе

На рис. 2 представлена диаграмма вариантов использования, построенная на основе ана-

лиза требований заказчика, а также типовых ролей пользователей, рассмотренных в статье «Анализ требований при разработке архитектуры аналитического хранилища данных».

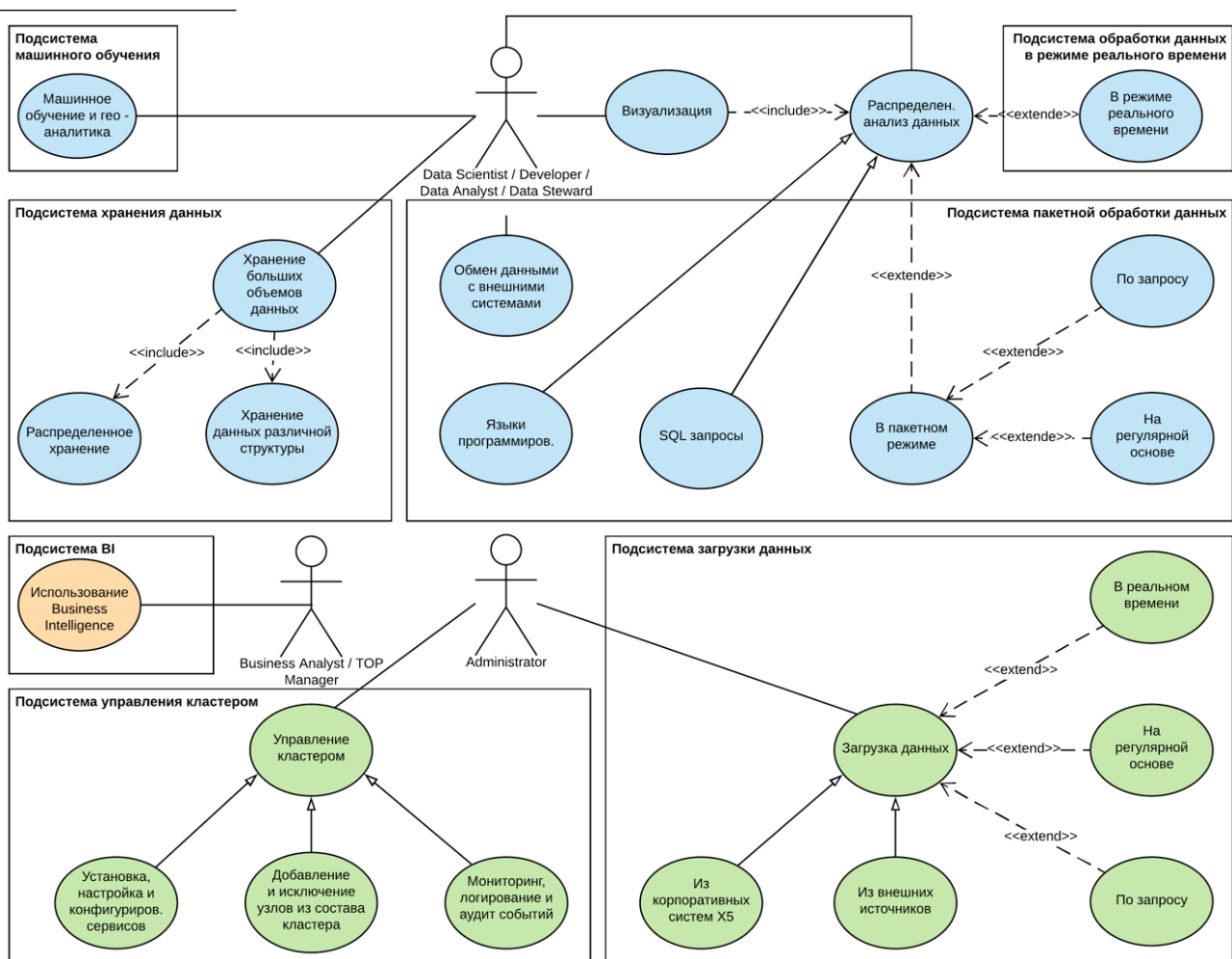


Рис. 2. Функциональные требования. Диаграмма вариантов использования

Моделирование целевой архитектуры

Исходя из описанных выше требований, было принято решение о разработке гибридного аналитического хранилища данных, включающего в себя следующие компоненты:

- платформа Big Data;
- реляционная база данных класса MPP;
- решение для виртуализации данных.

Гибридное хранилище данных предполагает наличие компонентов класса NewSQL. Данный компонент не будет рассматриваться в данном случае, т. к. у заказчика уже имеется подобное решение (SAP Hana) и оно будет интегрировано в итоговый вариант архитектуры.

Далее рассмотрим каждый компонент по отдельности и определим возможные варианты имплементации гибридного аналитического хранилища данных исходя из плюсов и минусов конкретных решений.

Выбор платформы Big Data

В настоящее время на рынке присутствуют различные решения от многих поставщиков. У каждого есть как свои плюсы, так и минусы, но одной из основополагающих технологий в дан-

ной сфере является Hadoop – проект фонда Apache Software Foundation, свободно распространяемый набор утилит, библиотек и фреймворк для разработки и выполнения распределённых программ, работающих на кластерах из сотен и тысяч узлов. Вокруг Hadoop образовалась целая экосистема из связанных проектов и технологий, многие из которых развивались изначально в рамках проекта, а впоследствии стали самостоятельными. При работе над решением, основанном на использовании продуктов экосистемы Hadoop, можно пойти двумя путями:

- загрузить каждый компонент по отдельности и попытаться собрать эти технологии в последовательную, гибкую и непротиворечивую архитектуру;

- использовать один из наиболее популярных дистрибутивов, в которых это сделано заранее.

Хотя первый вариант вполне возможен, принято решение остановиться на втором, так как он обеспечит простоту установки, администрирования и мониторинга всех входящих в поставку продуктов.

В таблице приводится сравнение двух наиболее популярных дистрибутивов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики дистрибутивов Hortonworks и Cloudera

Критерий	Hortonworks	Cloudera
Управление кластером	Свободное ПО Apache Ambari	Проприетарное ПО Cloudera Manager
Лицензирование	Распространение по open source лицензии	Распространение по коммерческой лицензии
Интерактивная аналитика	Самостоятельная установка Presto для интерактивной аналитики	Коммерческий компонент Impala для интерактивной аналитики
Популярность в мире	Существует с 2011 года	Существует с 2008 года, большее количество пользователей
SQL в пакетном режиме	Быстрый вычислительный движок Hive on Tez	Более медленные Hive on Spark или Hive on MR
Поставка обновлений	Только стабильные версии компонентов	Последние версии компонентов
Инструментарий интеграции данных	Имеет решение для управления данными HDF	Необходимость использовать несколько различных инструментов

По результатам проведения сравнения принято решение остановиться на дистрибутиве от компании Hortonworks, как наиболее подходящем для реализации решения на основе гибридной архитектуры.

На рис. 3 изображены пакеты, которые присутствуют в последней версии дистрибутива Hortonworks [5].

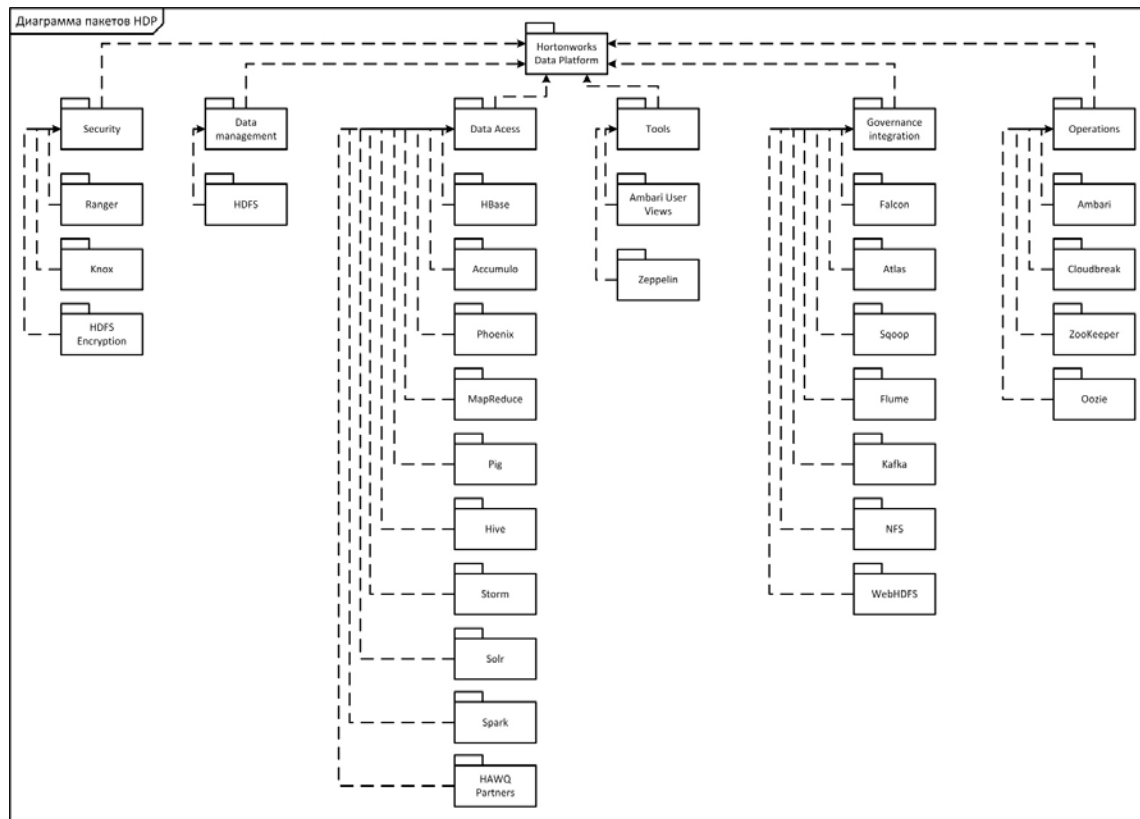


Рис. 3. Компоненты дистрибутива Hortonworks

Выбор реляционной базы данных класса MPP

На основе отчета Gartner Magic Quadrant for Data Management Solutions for Analytics 2017 (рис. 4) выбраны следующие системы класса MPP:

- Azure SQL Datawarehouse
- IBM db2 Warehouse (dashDB local)
- Microfocus Vertica (ex. HP Enterprise)

- Oracle Exadata
- Pivotal Greenplum
- SAP Hana (SAP Vora 2.0)
- Teradata

Из выборки были исключены решения класса NoSQL, NewSQL и продукты, предлагающиеся только в облаке, не сертифицированные в РФ.



Рис. 4. Отчет Gartner Magic Quadrant for Data Management Solutions for Analytics 2017

В табл. 2 представлены решения класса MPP от различных вендоров и проведено их качественное сравнение для выявления пре-

имуществ и существенных ограничений. В табл. 3 приведено сравнение решений в разрезе наиболее важных критериев.

Таблица 2

Качественное сравнение решений класса MPP от различных вендоров

Продукт	Преимущества	Ограничения	Опыт в России	Мировой опыт
Microfocus Vertica (Cloudera CDH 5.5+, Hortonworks HDP 2.2+)	Может быть установлена как независимая MPP, так и над Hadoop. Во втором случае возможно многопоточное чтение данных в MPP из Hadoop. Установка на commodity оборудование. Поколоночное хранение данных в MPP.	Отсутствует интеграция с Presto. Двусторонний обмен данными между MPP и Hadoop не возможен. Модель лицензирования по исходным несжатым данным.	Lamoda Открытие	Twitter
Oracle Exadata (Cloudera CDH 5.5+)	Многопоточный доступ к данным со стороны MPP системы к данным Hadoop. Presto может использовать MPP как один из источников. Эффективное управление нагрузкой MPP системы, оптимизация запросов на основе статистики данных. Возможность держать горячие данные в flash-памяти MPP.	Сильная связанность с собственными продуктами – возможна только интеграция с Oracle BigData Appliance. Только дистрибутив Cloudera. Поставляется только в виде ПАК.	Альфа-Банк Почта Банк (30 ТБ)	Allegro Group (Польша) Deutsche Bank
SAP Vora 2.0 (Cloudera CDH 5.5+, Hortonworks HDP 2.2+)	Хранение горячих данных в RAM. Виртуализация данных в MPP.	Сильная связанность со стекком продуктов SAP. Отсутствует интеграция с Presto.	Не известно	
IBM db2 Warehouse (dashDB local)	Установка на commodity оборудование. Поколоночное хранение данных в MPP.	Отсутствует интеграция с Presto. Двусторонний обмен данными между MPP и Hadoop не возможен. Сильная связанность с собственными продуктами - IBM db2 BigSQL.	Не известно	
Pivotal Greenplum/ Apache HAWQ (Cloudera CDH 5.5+, Hortonworks HDP 2.2+)	Presto может использовать MPP как один из источников. Эффективное управление нагрузкой MPP системы, оптимизация запросов на основе статистики данных. Установка на commodity оборудование. Многопоточное чтение данных из Hadoop в MPP. Поколоночное хранение данных в MPP. Open Source дистрибутив.	Имеет выделенные сервера для подключения пользователей. Продукт использует версию Postgres 8.3 (2008 год) и отдельные функции версии 9.1 (2011 год).	Tinkoff (35 ТБ) Ростелеком (80 ТБ)	Trial company (600 ГБ) Bakrie Telecom
Teradata (Cloudera CDH 5.5+, Hortonworks HDP 2.2+)	Возможно использовать ПАК или установить на commodity оборудование. Многопоточный двусторонний обмен данными между MPP и Hadoop. Интеграция с Presto. Эффективное управление нагрузкой MPP системы, оптимизация запросов на основе статистики данных. Поколоночное хранение данных в MPP. Возможность держать горячие данные в RAM MPP.		Сбербанк (1 ПБ) ВТБ 24 (200 ТБ) МТС ФНС (60 ТБ) Магнит	Walmart Tesco Schwarz Gruppe Apple Ebay Netflix

Продолжение табл. 2

Продукт	Преимущества	Ограничения	Опыт в России	Мировой опыт
Azure SQL Datawarehouse (Azure Data Lake Store)	Интеграция с Presto. Поколоночное хранение данных в MPP.	Возможна установка on-premise при приобретении Azure Stack. Интерактивный доступ только к Azure Data Lake Store.	Не известно	

Таблица 3

Сравнение решений класса MPP по критериям

	Стоимость лицензирования	Стоимость Enterprise поддержки	Возможность установки на commodity оборудование	Интеграция с Hadoop	Интерактивный доступ к данным в Hadoop	Интерактивный двусторонний доступ	Интеграция с Presto	Доступ к сторонним данным через Presto	Поколоночное хранение данных	In-Memory	Поддержка дистрибутивов Hadoop	Успешный опыт внедрения в России
Pivotal Greenplum	0	\$	+	+	+	+	+	-	+	-	HDP, CDH	+
Teradata	\$	\$	+	+	+	+	+	+	+	+	HDP, CDH	+
IBM db2 Warehouse	\$	\$	+	+	+	-	-	-	+	-	HDP, CDH	+
Microfocus Vertica	\$	\$	+	+	+	-	-	-	+	-	HDP, CDH	+
Oracle Exadata	\$	\$	-	-	+	-	-	-	+	+	CDH	+
SAP Vora	\$	\$	+	+	+	-	-	-	-	+	HDP, CDH	-
Azure SQL Datawarehouse	\$	\$	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-

Продолжение табл. 3

	Управление конкурентной нагрузкой пользователей	Оптимизатор запросов	Поддержка R/Python	Хранение и работа с гео-данными / документами / графами	Инструменты администрирования и мониторинга	Использование MPP как движка для SAS	Использование MPP как движка для IBM Cognos TM1	Использование MPP как движка для IBM SPSS	Интеграция с ArcGIS
Pivotal Greenplum	+	+	+	+/+/+	+	+	+	-	-
Teradata	+	+	+	+/+/+	+	+	+	+	+
IBM db2 Warehouse	+	+	+	+/+/-	+	+	+	+	+
Microfocus Vertica	+	+	+	+/+/-	-	+	-	-	-
Oracle Exadata	+	+	-	+/+/-	+	+	+	-	+
SAP Vora	+	-	-	-/+/+	+	-	-	-	-
Azure SQL Datawarehouse	+	+	-	+/-/-	+	+	-	-	-

Исходя из полученного сравнения, считаем решение Teradata лидером и далее используем данный компонент в качестве MPP платформы.

Решение для виртуализации данных

Для связи Data Lake и MPP компонент и предоставления бесшовного доступа к данным

используется модель виртуализации данных. Далее рассмотрим подробнее два решения: Presto и Apache Drill.

Presto – это распределенный сервис SQL-запросов с открытым исходным кодом. Presto может обрабатывать данные из множества различных источников (рис. 5).

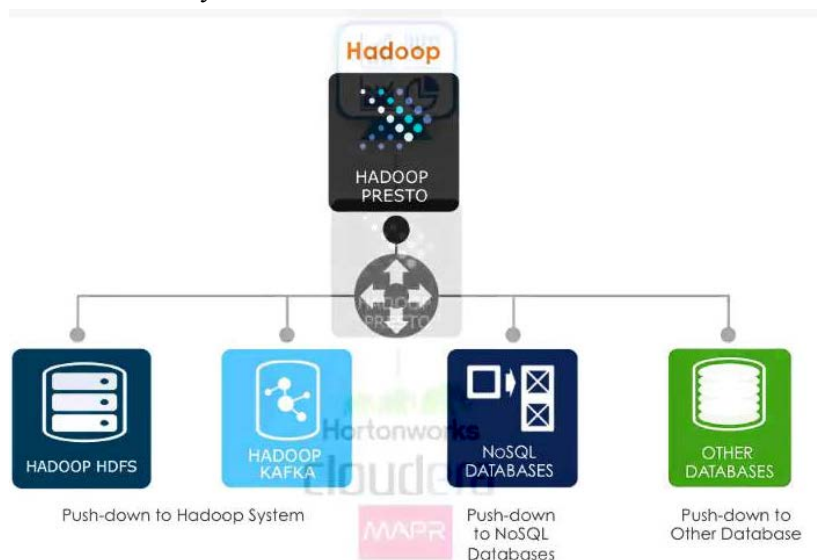


Рис. 5. Схема Hadoop Presto

Дата первого релиза: Январь 2013

Количество коммитов: 12 381

Поддерживаемые источники: Acumulo, Hive, Cassandra, MySQL, MongoDB, Kafka, PostgreSQL, Redis, JDBC и другие

Пользователи: Facebook, Airbnb, Netflix, Dropbox и др.

Apache Drill – сервис для организации выполнения SQL-запросов над полуструктурированными данными, хранящимися в NoSQL-хранилищах (рис. 6).

Основываясь на предоставленной выше информации, принято решение использовать Presto.

Имплементация архитектуры гибридного аналитического хранилища данных

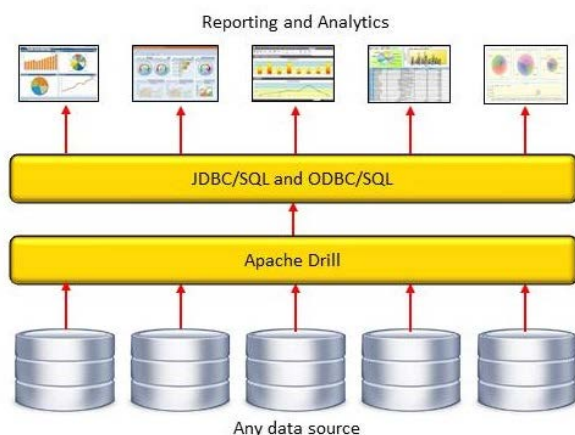


Рис. 6. Схема Apache Drill

Дата первого релиза: Июль 2013

Количество коммитов: 2 899

Поддерживаемые источники: Hbase, Hive, MongoDB, S3, JDBC и другие

Пользователи: Google

В результате рассмотрения различных вариантов компонентов для построения ГАХД остановились на Hortonworks в качестве платформы класса Big Data, Teradata – реляционной базы данных класса MPP и Presto – решения для виртуализации данных.

Результатом анализа данных компонентов, их интерфейсов, взаимодействия и функциональных возможностей стала целевая архитектура ГАХД для компании заказчика (рис. 7).

Данная архитектура представлена на диаграмме компонентов ниже в нотации UML (рис. 8).

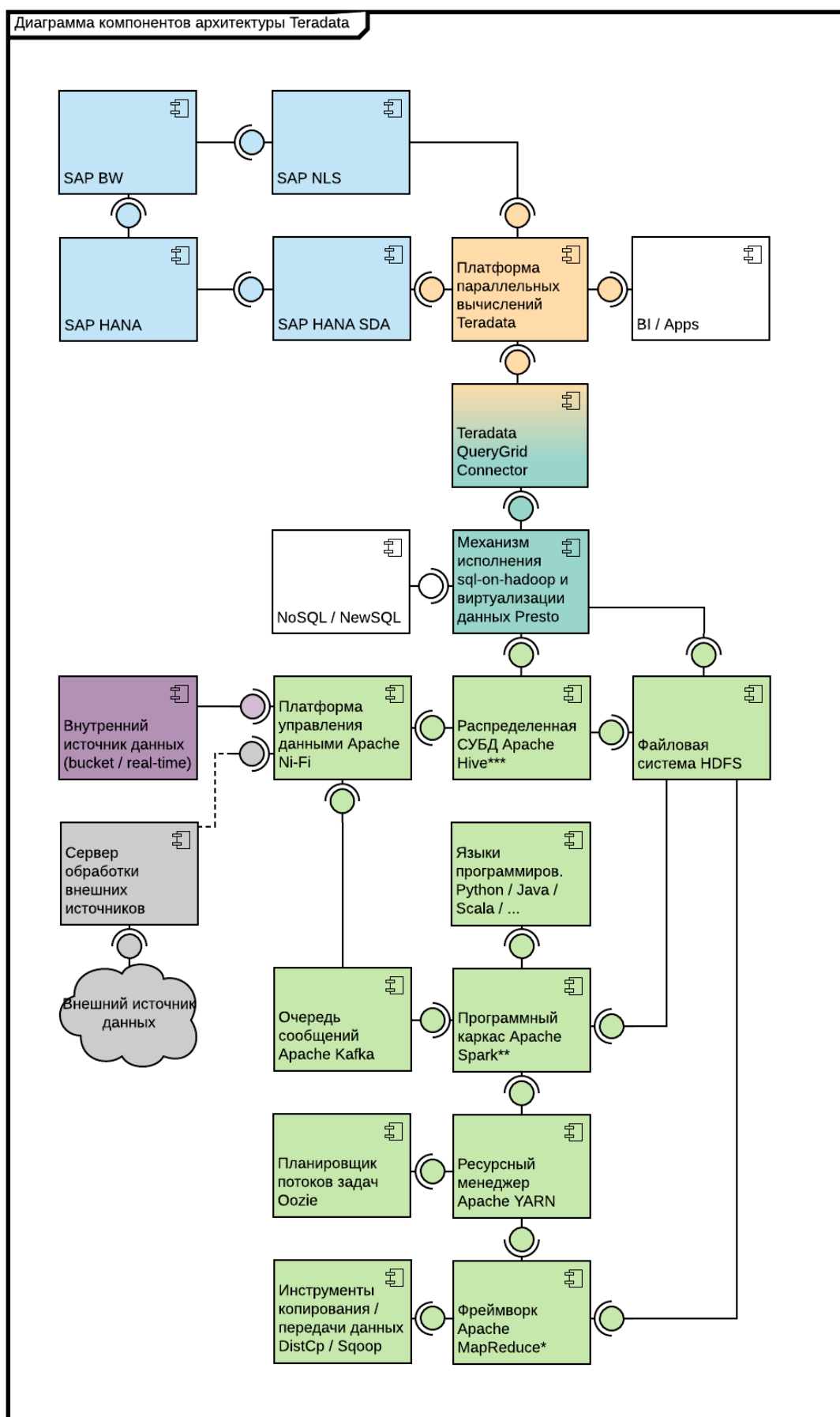


Рис. 7. Диаграмма компонентов решения

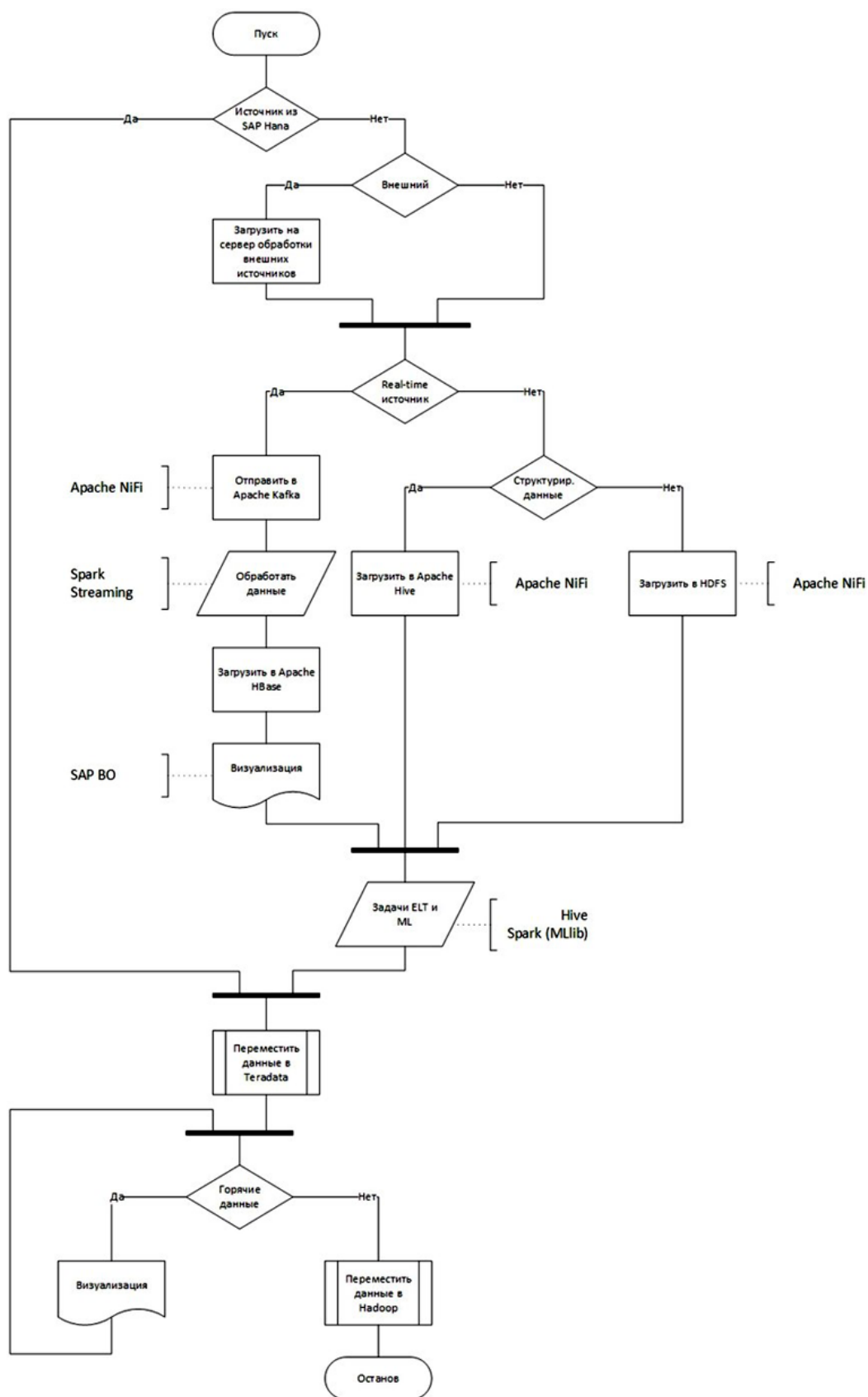


Рис. 8. Схема потоков данных

Заключение

Архитектура гибридных аналитических хранилищ данных, построенная на технологии Big Data, позволяет уменьшить расходы на ИТ-инфраструктуру и ПО, сократить затраты на рабочую силу за счет более эффективных методов интеграции данных, управления, анализа и выработки решения; обеспечить увеличение дохода и прибыли путем новых или более эффективных способов ведения бизнеса.

При этом сочетание использования ПО с открытым исходным кодом и снижение цен аппаратных систем сделало эти технологии более доступными.

Спроектированная система является горизонтально масштабируемой, отказоустойчивой и высокодоступной, отвечает всем современным требованиям к системам для хранения и анализа данных.

Литература

1. Marz N., Warren J., from Manning. Lambda Architecture Overview: Big Data book, 2015. 256 с.
2. Azarmi B. Scalable Big Data Architecture // Apress, 2015. 137 с.
3. Исаев Д.В. Аналитические информационные системы. М.: ГУ-ВШЭ, 2008. 24 с.
4. Уайт Т. Hadoop: подробное руководство. СПб.: O'Reilly; Питер, 2013. 437 с.
5. Maximize the value of data-at-rest: [Электронный ресурс]: Hortonworks. 2016. Режим доступа: <http://hortonworks.com/products/data-center/hdp/>, свободный (дата обращения: 12.09.2016).
6. Making Sense of it All. Lambda Architecture: [Электронный ресурс]: Hortonworks. 2016. Режим доступа: <https://www.mapr.com/developercentral/lambda-architec> (дата обращения: 12.09.2016).
7. Lambda Architecture: [Электронный ресурс]: lambda-architecture.net. 2016. Режим доступа: <http://lambda-architecture.net/> (дата обращения: 12.09.2016).
8. Real time architecture using Hadoop and Storm: [Электронный ресурс]: SladeShare. 2016. Режим доступа: http://www.slideshare.net/nathan_gs/a-real-time-archi. (дата обращения: 12.09.2016).

Поступила 31.05.2019; принята к публикации 31.07.2019

Информация об авторах

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел. (473) 2-46-77-18

Барabanов Владимир Федорович – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvf@list.ru, тел. (473) 2-46-77-18

Логин Фёдор Геннадьевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: lfgoff@bk.ru, тел. (473) 2-46-77-18

Коваленко Сергей Александрович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sergpc@yandex.ru, тел. (473) 2-46-77-18

TARGET ARCHITECTURE OF A HYBRID ANALYTICAL DATA WAREHOUSE FOR AN E-COMMERCE ENTERPRISE

S.L. Podval'nyy, V.F. Barabanov, F.G. Loginov, S.A. Kovalenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses solutions for the collection, storage, real-time processing and analysis of Big Data for one of the leading Russian multi-format food retail companies operating in the field of direct retail sales and e-Commerce. The objects of research are: customer requirements for the system; existing IT-architecture of the customer, including various systems-data sources, data warehouse, business intelligence and data visualization; best practices for building scalable high-load data processing and analysis systems; target architecture of the designed corporate data warehouse. The relevance of the solution development is determined by the fact that currently there is a constant increase in the volume of data, processing and analysis of which through the use of traditional data analysis methods is difficult or not feasible at all. In this connection, the development of a data warehouse of hybrid architecture, which includes components of the classic Business Intelligence, Big Data, as well as data virtualization tools, allowing one to combine these components within a single system, becomes the most popular direction of development. The article describes the collected, analyzed and agreed system requirements and the model of the target storage architecture developed with the help of UML. The result of the work described in the article is that the system meets all the requirements for systems for storing and analyzing large amounts of data, is horizontally scalable, fault tolerant and highly accessible. The resulting solution will reduce labor costs, and the use in the development of open source software can further reduce the cost of developing and using software

Key words: data storage, hybrid architecture of data warehouses, data processing and analysis system

References

1. Marz N., Warren J. "Lambda architecture overview: big data book", ISBN 978161729034, 2015, 256 p.
2. Azarmi B. "Scalable big data architecture", Apress, ISBN 978-1-4842-1326-1, 2015, 137 p.
3. Isaev D.V. "Analytical information systems" ("Analiticheskie informacionnye sistemy"), Moscow, GU-VSHE, 2008, 24 p.
4. White T. "Hadoop: detailed guide", St. Petersburg, O'Reilly, Piter, 2013, 437 p.
5. "Maximize the value of data-at-rest", Hortonworks, 2016, available at: <http://hortonworks.com/products/data-center/hdp/>
6. "Making sense of it all. Lambda architecture" Hortonworks, 2016, available at: <https://www.mapr.com/developercentral/lambda-architec>.
7. "Lambda architecture", lambda-architecture.net, 2016, available at: <http://lambda-architecture.net/>
8. "Real time architecture using Hadoop and Storm", SladeShare, 2016, available at: http://www.slideshare.net/nathan_gs/a-real-time-archi.

Submitted 31.05.2019; revised 31.07.2019

Information about the authors

Semen L. Podval'nyy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru

Vladimir F. Barabanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvf@list.ru

Fedor G. Loginov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: lfgoff@bk.ru

Sergey A. Kovalenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sergpc@yandex.ru

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕСТА ВНУТРИСХЕМНОГО КОНТРОЛЯ ЦИФРОВЫХ СХЕМ

Г.В. Петрухнова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: объектом исследования является тест контроля цифрового устройства на наличие неисправностей, моделируемых как «константная» и «короткое замыкание». Тест представлен бинарной матрицей. Минимальной структурной единицей разбиения бинарной матрицы является ее столбец. В качестве преобразований выбраны перестановки одинаковых столбцов между собой. Такие преобразования сохраняют структуру матрицы. Исследуются свойства симметрии бинарной матрицы и определяется мера ее симметричности. Построенная модель позволила получить энтропийный критерий, позволяющий ранжировать тесты, представляющие собой бинарную матрицу, в порядке их предпочтительности. Показано использование полученных теоретических результатов в задачах тестового контроля цифровых устройств. Представленный критерий позволяет анализировать наличие одиночных неисправностей типа «константная» и «короткое замыкание» и определять качество тестов, представленных бинарной матрицей. Контрольные точки могут включать входы цифрового устройства, его выходы и доступные внутренние точки. Предполагалось, что неисправность типа «короткое замыкание» может возникнуть между любыми контрольными точками тестируемой цифровой схемы, неисправность типа «константная» – в любой контрольной точке тестируемой цифровой схемы. Строились тесты, покрывающие все возможные одиночные неисправности указанных типов в контрольных точках. Представлены результаты исследования полученного критерия. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о целесообразности использования энтропийного критерия в теории и практике тестирования цифровых устройств

Ключевые слова: энтропия, симметрия, бинарная матрица, цифровое устройство, тестовый контроль, неисправность типа «короткое замыкание», неисправность типа «константная»

Введение

Внутрисхемный контроль цифровых устройств (в дальнейшем ВК) – это информационная операция тестирования [1], которая предполагает подачу на одни контакты цифрового устройства совокупности входных сигналов внутрисхемного контроля, снятие с других контактов этого устройства реакции на эти сигналы и последующий анализ информации. Цифровое устройство, например, может быть представлено в виде печатной платы. Контакты цифрового устройства, с которых снимается реакция, могут находиться как внутри схемы, так и на выходе. Цель внутрисхемного контроля – выявить неисправности типа «константная» (или, другими словами, «фиксация») и типа «короткое замыкание» (или, другими словами, «перемычка»). Операцию внутрисхемного контроля можно считать первоначальной стадией функционального (в дальнейшем ФК).

Можно утверждать, что обе эти операции ВК и ФК в системе обеспечения качества различных изделий относятся к контрольными испытаниями [1]. В технологическом процессе производства цифровых устройств внутрисхемный контроль имеет очень низкую себестоимость по сравнению с себестоимостью после-

дующих операций контроля [2]. Однако в абсолютном отношении, себестоимость операций внутрисхемного контроля является достаточно высокой и может достигать десятков процентов от цены производимых цифровых устройств.

Можно выделить две производственные стадии операции ВК. На первой из них цифровое устройство не подключают к источнику питания, и в топологии печатной платы локализуют неисправности типа «короткое замыкание». Ставится цель не только поиска неисправностей, но и предотвращения возможного возникновения вторичных неисправностей и выхода из строя цифрового устройства в целом. На второй стадии устройство подключают к питанию и также проводят контроль наличия возможных неисправностей типа «константная» и «короткое замыкание».

В статье рассмотрен синтез тестов ВК цифровых устройств для второй стадии. При этом сокращение длины теста ВК является источником снижения рассмотренной выше себестоимости. Для вывода критерия оценки качества тестов использованы методы системного анализа [1], [3].

Постановка задачи

Пусть имеется бинарная матрица из K столбцов и N строк:

$$\begin{matrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1k} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nk} \end{matrix} \quad (1)$$

Построим структурную модель матрицы (1). Пусть минимальная единица разбиения – это столбец матрицы. Поскольку рассматриваемая матрица является бинарной, то ее столбец – двоичный набор. Число возможных типов двоичных наборов из K элементов есть 2^K . Пусть $R = 2^K$. Получаем R классов двоичных наборов, при этом каждый набор отличается от других своей структурой. Из всего этого многообразия оперировать можно только K двоичными наборами (по числу столбцов матрицы).

Проведем классификацию столбцов бинарной матрицы. Каждый из классов будет содержать двоичные наборы, между которыми расстояние по Хэммингу равно нулю:

$$\sum_{l=1}^K y_{ml} \oplus y_{nl} = 0, \quad (2)$$

где y_{ml} – m -й элемент l -й строки матрицы (1), y_{nl} – n -й элемент l -й строки матрицы (1), K – число столбцов матрицы (1).

Если, например, в матрице (1) имеются столбцы, содержащие все нули, и столбцы, содержащие только единицы, то в один класс включим двоичные наборы (столбцы), состоящие из нулей, в другой – двоичные наборы (строки), состоящие из единиц.

Классы могут отличаться друг от друга по числу элементов (столбцов). Часть классов эквивалентна пустому множеству, если соответствующие типы столбцов отсутствуют в матрице (1). Пусть s – количество различных столбцов или, что то же самое, количество классов, отличных от пустого множества. Заметим, что $s \leq K$.

Матрицу можно преобразовать с сохранением ее структуры и каждого класса разбиения. Для этого рассмотрим перестановки одинаковых столбцов между собой.

Рассматриваемая задача может быть сформулирована следующим образом: на базе построенной выше модели определить меру симметричности матрицы (1), и на основе этой меры синтезировать энтропийный критерий качества, а также рассмотреть его применение в задачах внутрисхемного контроля цифровых схем.

Вывод критерия качества

Мерой симметричности объекта называют число преобразований, не изменяющих каждый из классов разбиений. Такие преобразования называют автоморфизмами. В качестве преобразований, сохраняющих классы разбиения матрицы (1), выбраны перестановки одинаковых столбцов матрицы между собой. Количество таких преобразований класса разбиения из l элементов будет равно $l!$. Мера симметричности f матрицы (1), структурные элементы которой разбиты на s классов, определяется согласно выражению (3):

$$f = \prod_{i=1}^s l_i! \quad (3)$$

где l_i – число столбцов в i -м классе разбиения; s – число возможных классов разбиения, отличных от пустого множества.

При этом должно соблюдаться приведенное ниже условие:

$$\sum_{i=1}^R l_i = K, \quad (4)$$

где K – количество столбцов бинарной матрицы (1).

Заметим, что число классов построенного разбиения растет с увеличением количества столбцов матрицы (1).

Мера симметричности матрицы достигает минимума при условии

$$l_1 = l_2 = \dots = l_m = 1, \quad (5)$$

т.е., когда столбцы матрицы различны.

Выражение (3) для вычисления меры симметричности бинарной матрицы является основой для синтеза энтропийного критерия качества. Критерий позволяет распределять объекты, представимые бинарной матрицей, в порядке их предпочтительности. В практическом плане из-за вычислительной сложности его применение нецелесообразно. Преобразуем выражение (3) в энтропийный критерий качества. Логарифм от функции имеет экстремальные точки там же, где и сама функция. Используем это свойство логарифма для вывода критерия качества и применим к выражению (3) формулу Стирлинга. После преобразований получим энтропийный критерий (6):

$$H(l_1, l_2, \dots, l_K) = \sum_{i=1}^s l_i \cdot \ln l_i, \quad (6)$$

где l_i – число столбцов в i -м классе разбиения; s – число возможных классов разбиения, отличных от пустого множества.

Использование критерия в задачах тестового контроля цифровых устройств

Полученный энтропийный критерий может применяться для анализа покрытия тестом возможных неисправностей, определения момента окончания тестирования и сокращения длины теста внутрисхемного контроля. Практическое использование критерия основано на принципе максимума энтропии. Поскольку критерий (6) не имеет знака минус, то наибольшему разнообразию структурных элементов бинарной матрицы будет соответствовать минимальное значение критерия.

Выделяют два типа наиболее часто встречающихся неисправностей цифровых устройств, выявляемых на стадии внутрисхемного контроля: «константные неисправности» и «короткое замыкание». Неисправность типа константная проявляется в виде наличия в контрольных точках постоянного уровня логического нуля или логической единицы. Неисправности типа «короткое замыкание» указывают на наличие паразитной связи между двумя или несколькими контрольными точками схемы цифрового устройства. Будем рассматривать одиночные неисправности, моделируемые этими двумя типами.

Пусть первичные входы цифрового устройства являются независимыми. Для удобства контроля указанных типов неисправностей пронумеруем контрольные точки схемы. Контрольными точками цифрового устройства могут быть его входы, выходы и внутренние точки, к которым возможен доступ. Пусть число таких точек есть K . В контрольных точках в соответствии с проведенной нумерацией будем фиксировать реакции устройства на входные воздействия. Из реакций составим матрицу, состоящую из K столбцов и N строк. N – это длина теста контроля.

Если с целью контроля на входы устройства подать все возможные тестовые наборы, то в результате получим избыточный и длительно исполняющийся тест. Для одного и того же устройства наиболее эффективным является самый короткий тест, покрывающий возможные неисправности рассматриваемых типов. При формировании и выборе тестов контроля будем руководствоваться тем, что качество тестов определяется их структурой, и при этом наиболее эффективному среди тестов одинаковой длины соответствует наименьшее значение критерия (6).

Другими словами, теоретически из множества тестов наибольшее количество одиночных неисправностей типа «короткое замыкание» должно покрываться тем тестом, для которого мера симметричности будет иметь наименьшее значение. Теоретически при покрытии тестом всех возможных неисправностей типа «короткое замыкание» значение его меры симметричности должна быть равна нулю. Чтобы покрыть тестом все возможные одиночные неисправности типа «константная», необходимо отсутствие в бинарной матрице, соответствующей тесту, столбцов, состоящих только из логических единиц или только из логических нулей.

Результаты исследования энтропийного критерия качества

Пусть имеется цифровая схема устройства с восемью контрольными точками. Устройство представляет собой «черный ящик». Необходимо проверить в контрольных точках наличие одиночных неисправностей типа «константная» и «короткое замыкание».

Будем считать, что неисправность типа «короткое замыкание» может иметь место между любыми контрольными точками схемы тестируемого цифрового устройства, а неисправность типа «константная» – в любой контрольной точке схемы. Построим тесты, покрывающие в контрольных точках все возможные одиночные неисправности рассматриваемых типов.

Оптимальным в этом случае будет тест, позволяющий получить в контрольных точках устройства логарифмический код. Представим логарифмический код в виде бинарной матрицы:

$$\begin{array}{cccccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{array} \quad (7)$$

Тест покрывает все неисправности типа «короткое замыкание». Первый столбец матрицы состоит только из логических единиц. Это означает, что тестом не покрывается неисправность «константный 0» в первой контрольной точке. По аналогии можно утверждать, что не покрывается неисправность «константная 1» в восьмой контрольной точке. Чтобы исправить ситуацию, необходимо добавить к матрице еще одну строку, например, строку (8), если схема допускает такую реакцию:

$$0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \quad (8)$$

В итоге будем иметь следующую бинарную матрицу:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Оценим качество этого теста на основе формулы (6) итерационно, т.е. для следующих случаев:

- 1) реакция устройства есть первая строка матрицы (один тестовый набор),
- 2) реакция устройства состоит из первых двух тестовых наборов,
- 3) реакция устройства состоит из первых трех тестовых наборов,
- 4) реакция устройства состоит из четырех тестовых наборов.

Результаты исследования критерия (6) представлены в табл. 1.

Первая строка матрицы состоит из четырех единиц и четырех нулей, отсюда имеем

$$4 \cdot \ln 4 + 4 \cdot \ln 1 = 8 \cdot 1.39 = 11.12$$

Если рассмотреть две строки матрицы, то получим:

- два столбца $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$;
- два столбца $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$;
- два столбца $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$;
- два столбца $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

Отсюда имеем:

$$4 \cdot 2 \cdot \ln 2 = 5.5.$$

Таблица 1

Оценка качества теста «логарифмический код»

Номер случая	Оценка качества теста
1	11.12
2	5.5
3	0
4	0

Критерий (6) оценивает качество теста, покрывающего неисправности типа «короткое замыкание». Данные неисправности покрываются тремя тестовыми наборами (7). Поэтому качество теста, состоящего из четырех наборов, не изменяется по сравнению с тестом, состоящим из трех тестовых наборов. Нулевое значение критерия (наименьшее значение) указывает на полное покрытие неисправностей типа «короткое замыкание».

Рассмотрим тест «бегущая единица», который представлен в виде бинарной матрицы ниже

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Данный тест не только покрывает все неисправности типа «короткое замыкание» и типа «константная», но и является диагностическим. Оценим качество этого теста итерационно, по аналогии с проделанным выше (табл. 2). Неисправности типа «короткое замыкание» покрываются тестом за 7 тестовых наборов, поэтому в седьмой строке таблицы значению критерия (6) соответствует 0. По мере покрытия тестом неисправностей значение критерия (6) уменьшается. Последний тестовый набор покрывает оставшуюся неисправность «константный 0». Значение критерия (6), представленное в первой строке табл. 1, меньше, чем значение этого критерия в первой строке табл. 2. Результат объясняется тем, что первый тестовый набор логарифмического теста является более информативным, чем первый набор теста «бегущая единица».

Таблица 2

Оценка качества теста «бегущая единица»

Количество наборов в тесте «бегущая единица»	Оценка качества теста
1	13.6
2	10.8
3	8.0
4	5.5
5	3.3
6	1.4
7	0
8	0

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о том, что среди множества тестов одинаковой длины, наиболее качественный соответствует меньшему значению критерия (6). Если тест покрывает все неисправности типа «короткое замыкание», то мера симметричности матрицы, соответствующей тесту, согласно выражению (6) будет равна 0.

Критерий (6) позволяет не только анализировать и оценивать качество тестов, но и сокращать длину избыточных тестов. Пусть имеется реакция цифрового устройства на

псевдослучайный тест, представленная в виде бинарной матрицы ниже:

```

0 0 0 1 0 0 0
1 1 0 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1
0 1 0 1 0 1 0
0 1 1 0 1 1 0
0 0 0 0 0 0 1
0 0 1 1 0 1 1
0 0 0 0 1 0 1

```

В табл. 3 приведены оценки качества фрагментов контроля цифрового устройства.

Таблица 3

Оценка качества теста на основе реакции цифрового устройства на псевдослучайный тест

Количество наборов в тесте	Оценка качества теста
1	13.6
2	8.8
3	4.7
4	1.4
5	1.4
6	1.4
7	0

Согласно табл. 3, тестовым наборам под номерами 4, 5 и 6 соответствует одинаковое значение критерия (6). Следовательно, два из этих наборов можно удалить как содержащие избыточную информацию. Набор 5 является единственным набором из этой тройки, покрывающим константные неисправности на третьем и пятом выводах схемы (столбец 3, 5 матрицы), поэтому оставим именно его. Четвертый, шестой тестовые наборы не несут никакой полезной информации о неисправностях и также могут быть удалены из теста. На этом этапе получаем тест, покрывающий все неисправности типа «короткое замыкание». На последнем наборе из табл. 3 (седьмом) значение критерия (6) становится равным 0, и столбцы матрицы, соответствующей тесту, также будут различны. Восьмой набор (в табл. 3 не приведен) и последующие за ним любые тестовые наборы будут избыточными, поскольку все одиночные неисправности типа «короткое замыкание» и «константная» тестом покрыты. Добавление новых тестовых наборов не изменит значение критерия (6).

Результаты экспериментальных исследований критерия (6) позволяют сделать выводы о целесообразности его применения для решения задач тестирования цифровых устройств и

об эффективности использования принципов симметрии в научных исследованиях.

Заключение

На основе проведенной структуризации бинарной матрицы (1) определена её мера симметричности, которая позволила ввести энтропийный критерий качества.

Рассматривались возможные неисправности типа «короткое замыкание» и типа «константная». Предполагалось, что первая из этих неисправностей может возникнуть между любыми контрольными точками схемы тестируемого цифрового устройства, а неисправность типа «константная» – в любой контрольной точке.

Критерий исследован на основе типовых тестов, покрывающих в контрольных точках цифровых устройств все возможные одиночные неисправности указанных типов. Оценивалось качество тестов.

Исследования показали, что из множества тестов большее количество одиночных неисправностей типа «короткое замыкание» покрывается тем тестом, для которого мера симметричности, согласно критерию (6), является наименьшей. Согласно экспериментам при покрытии тестом всех возможных неисправностей типа «короткое замыкание» значение критерия (6) становится равным нулю. По результатам исследований можно утверждать, что покрытие тестом всех возможных одиночных неисправностей типа «константная» достигается при отсутствии в бинарной матрице, соответствующей тесту, столбцов, состоящих только из логических единиц, или только из логических нулей.

Экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности использования полученного энтропийного критерия для разработки тестов внутрисхемного контроля цифровых устройств. Рассмотренный подход к синтезу тестов может быть использован в задачах исследования качества объектов различной природы, представляемых бинарной матрицей.

Язык симметрии является универсальным. Можно утверждать, что использование принципов симметрии позволяет эффективно решать задачи классификации и управления качеством объектов, относящихся к различным областям человеческих знаний.

Литература

1. Петрухнова Г.В. Энтропийный критерий на основе меры симметричности бинарной матрицы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 1. С. 66-72.
2. Клюквин Н. Новые горизонты внутрисхемного контроля печатных узлов // Печатный монтаж. 2007. № 6. С. 18-23.

3. Петрухнова Г.В. Анализ свойств симметрии бинарной матрицы в задачах тестирования цифровых устройств // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: тр. Междунар. науч. конф. Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2019. С. 1595-1606.

Поступила 30.05.2019; принята к публикации 31.07.2019

Информация об авторах

Петрухнова Галина Викторовна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: gvpetruhnova@mail.ru

QUALITY EVALUATION OF THE IN-CIRCUIT CONTROL TEST OF DIGITAL CIRCUITS

G.V. Petruhnova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the object of research is control test to analyze the faults which are modeled as «stuck-at faults» and «bridging faults». The test model is a binary matrix. A matrix column is a minimal unit of binary matrix's partitioning into structural elements. The reciprocal permutations of identical matrix columns are selected as transformations. Under such transformations, the matrix structure is preserved. The symmetry properties of a binary matrix are investigated and the symmetry measure of the matrix is calculated. The obtained criteria allow us to rank the tests, represented by the binary matrix, in the order of their preference. The use of the obtained theoretical results in the tasks concerned with test control of digital devices has been shown. The presented criteria allows to analyze the presence of «stuck-at faults» and «bridging faults», and to determine the quality of test represented by a binary matrix. The control points can include the inputs of a digital device, its outputs and accessible internal points. It was assumed that a «bridging faults» could occur between any control points of the digital circuit under test, and «stuck-at faults» in any control points of the digital circuit under test. The tests were devised, checking all possible single faults of specified types at control points. The results of the study of the obtained criterion are presented. The experimental data analysis enables us to make a conclusion about the expediency of using the entropy criteria in the theory and practice of digital device testing

Key words: entropy, symmetry, binary matrix, digital device, test control, a fault of the «bridging faults » type, a fault of the «stuck-at faults» type

References

1. Petruhnova G.V. 'Entropy criterion based on measure of a binary matrix symmetry', *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2019, no. 1, pp. 66-72.
2. Klyukvin N. 'New horizons of in-circuit control of printed nodes', *Printed wiring (Pечатnyy montazh)*, 2007, no. 6. pp. 18-23.
3. Petruhnova G.V. "The analysis of of binary matrix symmetry properties in the tasks concerned with testing of digital devices", *Proc. of Intern. Conf. "Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems" ("Aktual'nye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki")*, Voronezh, Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, 2019, pp. 1595-1606.

Submitted 30.05.2019; revised 31.07.2019

Information about the author

Galina V. Petruhnova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026 Russia), e-mail: gvpetruhnova@mail.ru

Радиотехника и связь

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.4.005

УДК 621.396.67

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЛИНЗЫ РОТМАНА
ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ НА ПОДВИЖНЫХ НОСИТЕЛЯХ****Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, С.М. Фёдоров, В.И. Чугуевский****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: исследуется влияние изменения геометрии полосковой линзы Ротмана на ее рабочие характеристики. Линза Ротмана (иногда называемая линза Ротмана-Тёрнера) представляет собой тип диаграммообразующей схемы. Эта линза позволяет формировать несколько антенных лучей без использования переключателей или фазовращателей. Антенные элементы подключены к одной из торцевых сторон линзы, при этом порты лучей находятся на противоположной стороне. Вы можете представить линзу как квази-микрополосковую (или квази-полосковую) схему, где местоположение портов лучей подобрано так, чтобы достичь постоянных фазовых сдвигов на портах антенных элементов. Когда антенные элементы запитываются линейно изменяемыми фазами, устройство ведет себя точно как фазированная решетка. Одним из замечательных свойств этой линзы является то, что, несмотря на наличие множества портов на 50 Ом, они остаются изолированными, поэтому не оказывают влияния на потери (или зашумленность) смежных лучей. У хорошо спроектированной линзы Ротмана потери могут составлять всего 1 дБ. Поскольку структура больше похожа на плоскопараллельный волновод, чем на линию передачи, линейные программы моделирования антенн не подходят, и приходится использовать численные методы, которые применял сам Ротман, или мощные программные комплексы. В результате проведенного натурного эксперимента получены характеристики согласования для исходной и трансформированной линзы, которые сравниваются с расчетными параметрами антенны

Ключевые слова: антенная решетка, линза Ротмана

Введение

Одним из перспективных решений для построения широкополосных и сверхширокополосных многолучевых антенных решеток (МАР) является линза Ротмана. Линза Ротмана используется в качестве диаграммообразующей схемы (ДОС) и позволяет формировать в пространстве несколько независимых лучей и управлять ими, осуществляя сканирование пространства.

Так как принцип работы линзы Ротмана основан на различных путях распространения волны внутри ее структуры, она может работать в сверхширокой полосе частот. Однако на более низких частотах данная линза становится слишком громоздкой и потому трудной для интеграции в компактную конструкцию приемопередатчика. Также диапазон рабочих частот линзы ограничен количеством антенных элементов и их коэффициентом развязки [1].

Проектирование антенного устройства

Чтобы полностью понять концепцию этих сложных линз, необходимо рассмотреть

основную концепцию ДОС СВЧ диапазона. Линза Ротмана обладает отличными характеристиками для применения во многих приложениях таких, как направленные передающие антенны на спутниках, удаленно пилотируемые транспортные средства, радары для предотвращения столкновений, сверхширокополосные системы связи и многое другое. Ограниченные линзовые антенны являются особым видом ДОС. Они имеют некоторое сходство с диэлектрическими линзами и зеркальными антеннами, с одной стороны, и с антенными решетками, с другой. Их функция заключается в формировании лучей ориентированных в нескольких разных направлениях, которые соответствуют положению запитываемых антенн на фокальной поверхности. Ограниченными такие антенны называют из-за того, что волна, падающая на одну грань решетки, не обязательно подчиняется закону Снеллиуса при прохождении через тело линзы. Вместо этого она «ограниченна» требованием следовать по траекториям соответствующим линиям передачи. В отличие от диэлектрических линз или рефлекторных антенн, линзовые антенны выполняют их коллимацию (передачу) и фокусировку (прием) дискретно, используя антенные решетки. Частотно-независимые характеристики угла

наклона луча линзы из-за его временной задержки делают его идеальным для многих широкополосных радиосистем.

Конструкция линзы Ротмана определяется уравнениями Ротмана-Тернера [2]. Стоит отметить, что рабочие характеристики линзы Ротмана сильно зависят от отражений волны внутри линзы. Поэтому для уменьшения коэффициента отражения на боковых сторонах линзы устанавливают балластные порты, к которым подключаются согласованные нагрузки.

Отметим, что большие линейные размеры такой ДОС могут привести к проблемам при ее установке. Так, размеры линзы Ротмана, рассчитанной для подложки из полистирола ($\epsilon=2,55$) толщиной 2 мм, для работы в частотном диапазоне от 3 до 8 ГГц [3], составляют 300х355 мм (рис. 1). Размеры собранной антенной решетки, построенной на основе линзы Ротмана, в зависимости от выбора излучающей системы увеличиваются еще на 20-50%. Поэтому экспериментальное исследование влияния изменения геометрии линзы на ее рабочие характеристики является актуальной задачей [4-6].

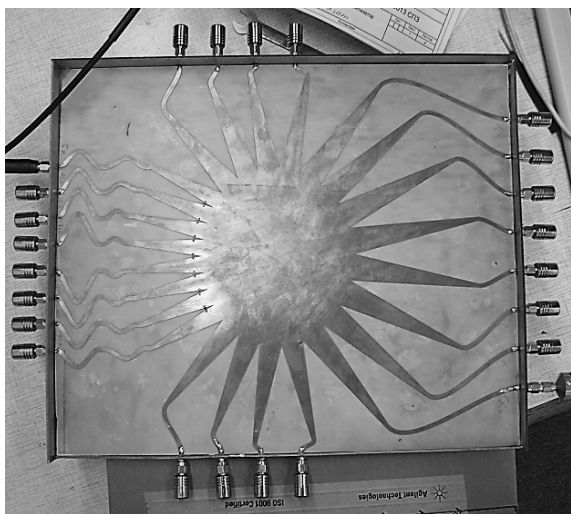


Рис. 1. Структура линзы Ротмана

Топология исследуемой линзы Ротмана была вытравлена на стеклотекстолите FR4 0,2 Cu350 DE117 ISOLA. Полученная структура склеивалась с подложкой из полистирола. Несущая конструкция антенны изготовлена из 3-х алюминиевых уголков, в которых просверлены отверстия с нарезанной резьбой под СВЧ-разъемы.

В данной работе рассматривался вариант линзы Ротмана согнутой на 90° по центральной оси антенны (рис. 2). Швы оплавивались

тонкой медной фольгой. Для удобства измерений и расположения согласованных нагрузок на неиспользуемых в измерениях портах была изготовлена рамка из стеклотекстолита.

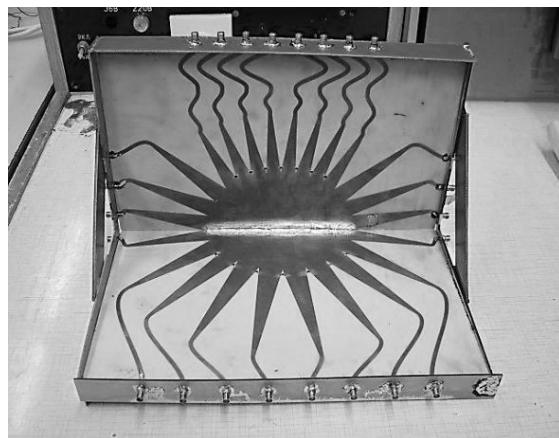


Рис. 2. Линза с трансформированной геометрией

На рис. 3 представлено схематическое изображение линзы Ротмана с порядковыми номерами портов.

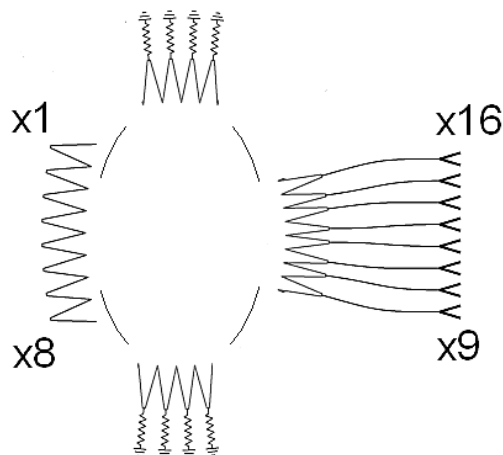


Рис. 3. Схематическое изображение линзы Ротмана

Исследование согласования ДОС производилось на Agilent Technologies N5230C серии PNA-L на частоте от 3 до 8 ГГц. Графики измерения КСВН входных и выходных портов представлены на рис. 4, 5. Как видно из результатов измерений КСВН в сверхширокой полосе частот не превышает 2,5. На рис. 4 представлен экспериментальный образец исследуемой линзы. Были измерены полные матрицы S-параметров для исходной линзы и для линзы, сложенной под углом 90 градусов (рис. 6 - 10).

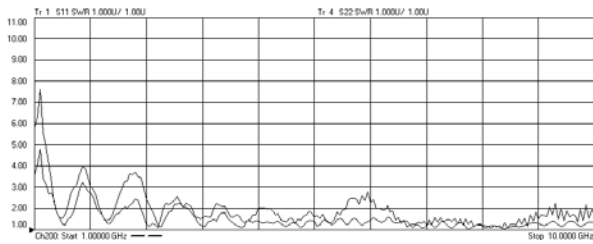


Рис. 4. КСВН центрального входного и выходного портов линзы Ротмана

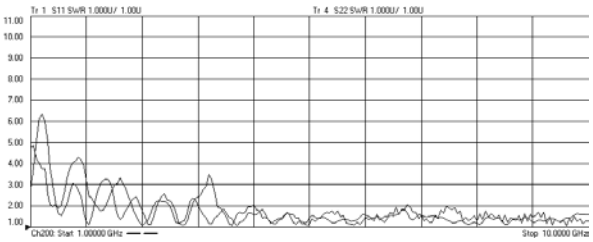


Рис. 5. КСВН крайних входного и выходного портов линзы Ротмана

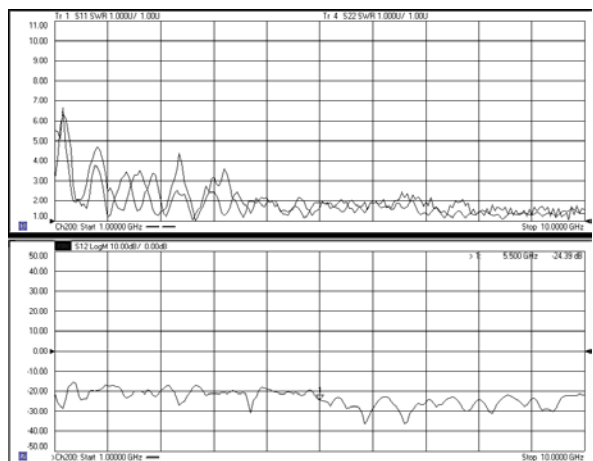


Рис. 6. Коэффициент передачи портов X8-X9

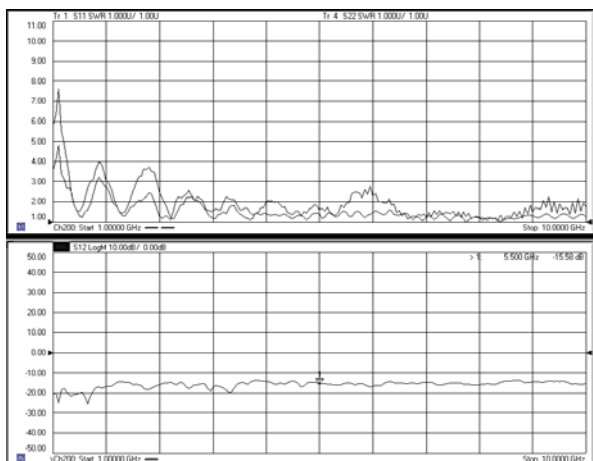


Рис. 7. Коэффициент передачи портов X4-X12

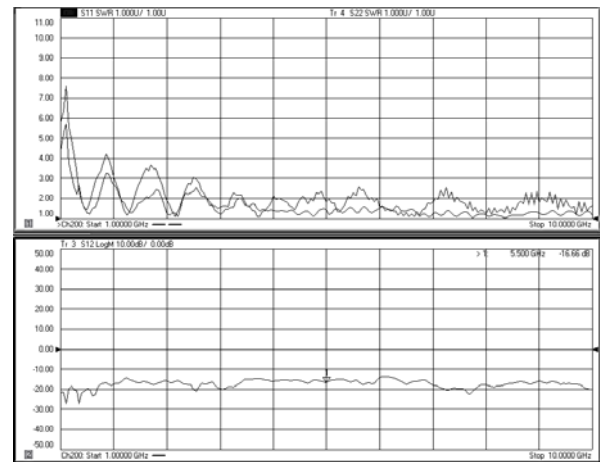


Рис. 8. Коэффициент передачи портов X4-X13

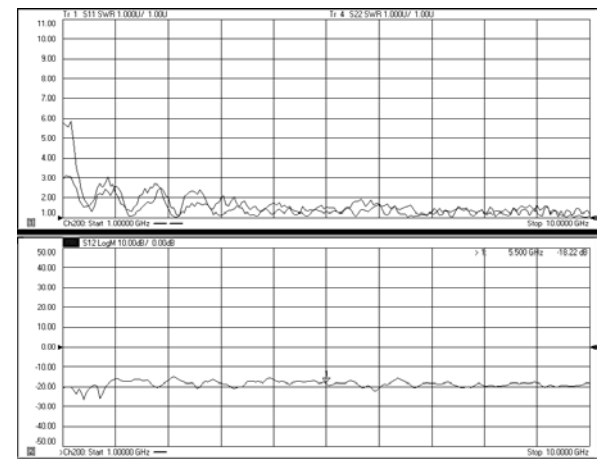


Рис. 9. Коэффициент передачи портов X4-X12 для линзы с трансформированной геометрией

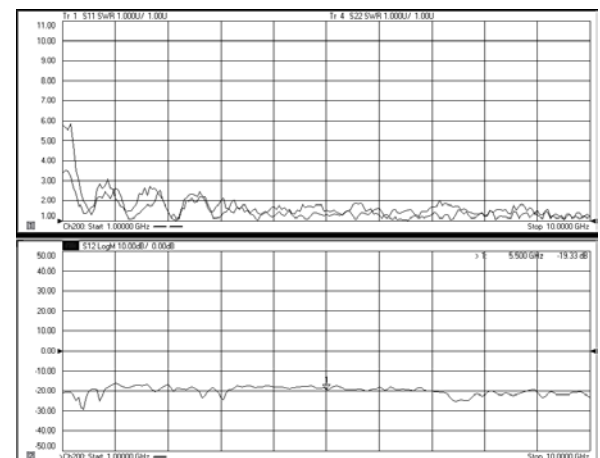


Рис. 10. Коэффициент передачи портов X4-X13 для линзы с трансформированной геометрией

Из полученных данных видно, что самые худшие результаты коэффициента передачи получаются на крайних противоположных портах линзы (X8,X9). Так значение коэффициента

передачи между портами X8,X9 на частоте 5.5 ГГц составляет -24,39 dB. Коэффициенты передачи между центральными портами X4,X12 и X4,X13 на частоте 5,5 ГГц составляют -15,58 dB и -16,66 dB соответственно. КСВН в диапазоне частот от 3 до 8 ГГц не превышает 3. После изменения геометрии линзы коэффициенты передачи между портами X4,X12 и X4,X13 на частоте 5,5 ГГц составляют -18,22 dB и -19,33 dB соответственно. КСВН в диапазоне от 3 до 8 ГГц не превышает 2.

Выводы

Таким образом, в результате проведенного эксперимента было выяснено, что изменение геометрии линзы Ротмана приводит к улучшению согласования и поэтому может быть использовано при размещении антенны на подвижный носитель.

Литература

1. Archer D. Lens-fed multiple beam arrays // Microwave Journal. 1984. Vol. 27. Pp. 171-172.
2. W. Rotman and R. F. Turner Wide angle microwave lens for line source applications // IEEE Trans. Antennas Propag. 1963. AP-11. Pp. 623-632.
3. Зеленин И.А., Рыжиков А.Г., Фёдоров С.М. Антенная решетка на основе линзы Ротмана // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 11. С. 102-105.
4. Пирогов А.А. Методы повышения помехозащищенности и эффективности кодирования сетей связи абонентского доступа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 162-163.
5. Разработка радиоэлектронных модулей с использованием планарных трансформаторов на основе многослойных печатных плат методом сквозного проектирования / А.А. Пирогов, А.Б. Буслаев, А.О. Дроздов, О.Ю. Макаров // Радиотехника. 2018. № 7. С. 11-15.
6. Сравнение статистических методов испытаний надёжности РЭС / А.С. Костюков, И.С. Бобылкин, Л.Н. Никитин, А.А. Пирогов // Надёжность и качество: тр. междунар. симпозиума, 2018. Т. 2. С. 35-37.

Поступила 20.05.2019; принята к публикации 31.07.2019

Информация об авторах

Коротков Леонид Николаевич - д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473) 246-66-47, e-mail: myfft@yandex.ru
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
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
Чугуевский Виталий Игоревич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: chuguevskiyv@rambler.ru

STUDY OF CHANGES OF ROTMAN LENS GEOMETRY FOR PLACING ON MOBILE CARRIERS

L.N. Korotkov, Yu.G. Pasternak, S.M. Fyedorov, V.I. Chuguevskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper investigates the influence of the change in the geometry of the Rotman strip lens on its performance. Rotman lens (sometimes called the Rotman-Turner lens) is a type of diagram-forming scheme. This lens allows you to form multiple antenna beams without using switches or phase shifters. Antenna elements are connected to one of the end sides of the lens, while the ports of the rays are on the opposite side. You can imagine a lens as a quasi-microstrip (or quasi-strip) scheme, where the location of the ports of the rays is chosen so as to achieve constant phase shifts on the ports of the antenna elements. When antenna elements are powered by linearly varying phases, the device behaves exactly like a phased array. One of the remarkable properties of this lens is that, despite the presence of multiple ports of 50 Ohms, they remain isolated, and therefore do not affect the loss (or noise) of adjacent rays. A well-designed Rotman lens can have a loss of just 1 dB. Since the structure is more like a plane-parallel waveguide than a transmission line, linear antenna modeling programs are not suitable, and you have to use numerical methods that Rothman himself used, or powerful software systems. As a result of the field experiment, we obtained the matching characteristics for the original and transformed lenses, which are compared with the design parameters of the antenna

Key words: antenna array, Rotman lens

References

1. Archer D. "Lens-fed multiple beam arrays", *Microwave Journal*, 1984, vol. 27, pp. 171-172
2. Rotman W., Turner R.F., "Wide angle microwave lens for line source applications," *IEEE Trans. Antennas Propag. AP-11*, November 1963, pp. 623-632.
3. Zelenin I.A., Ryzhikov A.G., Fedorov S.M. "Antenna array based on the Rothman lens", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2012, no. 11, pp. 102-105.
4. Pirogov A.A. "Methods to improve noise immunity and coding efficiency of subscriber access communication networks", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 1, pp. 162-163.
5. Pirogov A.A., Buslaev A.B., Drozov A.O., Makarov O.Yu. "Development of radio-electronic modules using planar transformers based on multilayer printed circuit boards using the end-to-end design method", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2018, no. 7, pp. 11-15.
6. Kostyukov A.S., Bobylkin I.S., Nikitin L.N., Pirogov A.A. "Comparison of statistical methods for testing the reliability of radio electronic device", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, 2018, vol. 2, pp. 35-37.

Submitted 20.05.2019; revised 31.07.2019

Information about the authors

Leonid N. Korotkov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 246-66-47, e-mail: myftt@yandex.ru
Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: pasternakyg@mail.ru
Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru
Vitaliy I. Chuguevskiy, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: chuguevskiyv@rambler.ru

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СЕГМЕНТА АНАЛИЗА

А.А. Афанасьев¹, Р.С. Власов¹, В.Г. Лисичкин¹, А.В. Питолин²

¹Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орёл, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: изложены материалы по исследованию такого свойства речевого сигнала, как однородность (подобность) распределения мгновенных значений отсчётов. Данное свойство может быть использовано в различных способах динамического определения границ сегментов обработки речи. Этот подход ориентирован на системы кодирования речи на основе линейного предсказания. В качестве параметров предсказания используются линейные спектральные частоты. Методы последовательной статистики, применяемые при анализе сегмента речи, требуют обоснованности ограничительных констант, необходимых для принятия решения о расширении сегмента. Данные константы рассчитываются исходя из ошибок первого и второго рода с учётом требований, предъявляемых к системам передачи речи. Линейные спектральные частоты, рассчитываемые на каждом шаге расширения, претерпевают незначительные (в пределах шага квантования) изменения по отношению к начальному сегменту. Это обстоятельство позволяет использовать результаты анализа начального участка для восстановления участка, расширенного вышеуказанным способом, что позволяет существенно снизить как вычислительную сложность, так и скорость кодирования речевого сигнала. При этом необходимо учитывать требования стандартов по алгоритмическим задержкам в обработке речи, которые ограничивают максимально возможный сегмент анализируемых данных по длине

Ключевые слова: речевой сигнал, сегмент анализа, линейные спектральные частоты, шаг квантования, расширение сегмента

Введение

В настоящее время наблюдаются устойчивые тенденции роста числа потребителей речевых услуг. Реализация этих тенденций требует расширения сервиса, за счёт использования эксклюзивных свойств речи. Использование систем, ориентированных на передачу неравномерно-распределённого во времени трафика позволило экономически эффективно реализовывать транспортировку речи в сетях, изначально ориентированных на передачу данных.

Таким образом, можно утверждать, что основными тенденциями развития сетей и систем связи в настоящее время являются следующие:

- повышение эффективности использования полосы пропускания каналов связи;
- реагирование на изменения скорости информационных потоков;
- передача речевой информации;
- расширение речевого сервиса.

То есть развитие современных телекоммуникационных технологий происходит при параллельном совершенствовании, с одной стороны, сетевых механизмов, а с другой – алгоритмов преобразования речи [1].

Высокое качество речевого сигнала, передаваемого с помощью алгоритмов, в основе

которых лежит метод линейного предсказания, при низких скоростях кодирования обеспечило их широкое распространение. Однако при обеспечении низкоскоростного кодирования со скоростями до 4 кбит/с, использование вышеуказанных способов приводит к снижению качества передачи.

Одним из направлений дальнейшего снижения скорости передачи речи с сохранением высокого качества – это переход к переменной скорости кодирования, учитывающий информационные и статистические избыточности сегментов речевых сигналов [2].

Постановка задачи

При линейном предсказании в качестве параметров, подвергаемых кодированию и передаче, используются значения передаточной функции голосового тракта и сигнала возбуждения.

Доминирующим методом при кодировании речевого сигнала в существующих системах связи является линейное предсказание. В основе данного метода лежит авторегрессионный анализ последовательностей мгновенных значений отсчётов (сегментов анализа), позволяющий представить отрезок речевого сигнала в виде набора параметров и некоего порождающего сигнала. В дальнейшем результаты та-

кого анализа (параметры и сигнал возбуждения) позволяют синтезировать исходный сигнал с требуемым качеством.

Полином передаточной функции синтезирующего фильтра имеет следующий вид:

$$A_M(Z) = 1 + \sum_{k=1}^M a_k Z^{-k}. \quad (1)$$

Исследования в предметной области речевого кодирования показали невозможность прямого интерполирования и квантования КЛП (a_k) при переходе от одного субсегмента к другому в рамках единого однородного сегмента данных, так как это приводит к высокой вероятности получения неустойчивого фильтра синтеза модели предсказания [3, 4, 5].

Для описания передаточной функции наиболее предпочтительными являются параметры, предложенные Итакурой [4, 5] и названные ЛСЧ или ЛСК.

Особенностью функционирования большинства систем обработки речевого сигнала является использование фиксированных сегментов анализа, не превышающих 30 мс.

Алгоритм определения ЛСЧ заключается в поиске нулей тригонометрических вспомогательных полиномов, получаемых из передаточной функции (1). Данный способ определения ЛСЧ широко известен и описан в [6]. В дальнейшем в качестве параметров ЛП будем подразумевать ЛСЧ.

Недостатками существующих подходов к определению ЛСЧ являются следующие:

1. Отсутствие адаптивного изменения границ анализируемого сегмента речевого сигнала на участках одинаковой природы (однородности) образования присутствующих в речи, и использование свойств однородности при определении ЛСЧ.

2. Значительный вычислительный ресурс, затрачиваемый на определение ЛСЧ на однородных сегментах.

Анализ речевых фрагментов позволяет сделать вывод о том, что возможно использование более длинных сегментов анализа, особенно на сегментах, имеющих квазипериодическую локализованную природу образования [2]. Существуют технические решения, реализующие переменную скорость кодирования и основанные на увеличении длины анализируемого сегмента.

Эти решения основаны на нормальном законе распределения отсчётов речевого сигнала и выявлении корреляционных взаимосвязей между ними.

Данное обстоятельство, во-первых, предполагает нормальность распределения резуль-

татов наблюдений, а во-вторых, не полностью устраняет статистическую избыточность речевого сигнала при кодировании, связанную с выбором длительности сегмента анализа. В задачах прикладного характера распределение значений речевого сигнала отличается от нормального. Таким образом, определение границ участка анализа должно быть основано на использовании более полной информации о статистических зависимостях между отсчётами речевого сигнала, получаемой с помощью непараметрических методов, т.е. при отсутствии данных о характере распределения.

Существует способ, учитывающий статистические взаимосвязи и независимый от наличия либо отсутствия данных о законе распределения мгновенных значений отсчётов речевого сигнала. Данный подход носит название способа выделения сегментов обработки речи на основе последовательного статистического анализа. Подход использует методы последовательной проверки статистических гипотез в сочетании с непараметрическими подходами к определению параметров распределения значений отсчётов, составляющих анализируемый сегмент [7].

Ставятся задачи оценки ограничительных констант, необходимых для оценки и функционирования способа выделения сегментов обработки речи на основе последовательного статистического анализа, и разработки алгоритма обработки речи при переменной длительности сегмента анализа.

Оценка ограничительных констант

Важным моментом при использовании данного способа, является правильный выбор ограничительных констант A и B . Данные константы отвечают за принятие решения о продолжении расширения сегмента. Необоснованный выбор этих параметров может привести к следующим последствиям:

1. Принятие неверного решения об остановке расширения сегмента, в то время как его статистические характеристики позволяют увеличивать границы с использованием уже вычисленных параметров предсказания. Эта ситуация чревата лишь неполнотой использования статистической избыточности РС, то есть снижением эффективности кодирования.

2. Принятие неверного решения о продолжении расширения, тогда как однородность сегмента не является достаточной. В данном случае использование уже вычисленных параметров предсказания на расширенном сегменте

приведёт к некорректному кодированию сигнала и как следствие к невозможности его восстановления на приёмной стороне с требуемым качеством.

В соответствии с основной ($H_0: F = F_0$) и конкурирующей ($H_1: F = F_1$) гипотезами, составляющими основу способа выделения сегментов первая ситуация соответствует уровню значимости или ошибке первого рода α , вторая – ошибке второго рода β .

Очевидно, что вероятность принятия решения о переходе выборки значений отсчётов анализируемого сегмента из «эффективной» области ($B < Z < A$) в «неэффективную» область ($Z \geq A$) по крайней мере в A раз больше при гипотезе H_1 , чем при H_0 . В свою очередь вероятность принятия решения о таком переходе равна α при справедливости гипотезы H_0 и $1 - \beta$, при справедливости H_1 . То есть справедливо неравенство [8]:

$$1 - \beta \leq A \cdot \alpha. \quad (2)$$

Неравенство (1) может быть записано в следующем виде:

$$A \leq \frac{1 - \beta}{\alpha}. \quad (3)$$

Таким образом, $\frac{1 - \beta}{\alpha}$ является верхней границей для A .

Подобным образом может быть получена и нижняя граница для B . Действительно, вероятность принятия решения о переходе выборки значений отсчётов анализируемого сегмента из «эффективной» области ($B < Z < A$) в «абсолютно эффективную» область ($Z \leq B$) по крайней мере в B раз больше при гипотезе H_1 , чем при H_0 . Так как вероятность принятия решения о таком переходе равна $1 - \alpha$ при справедливости гипотезы H_0 и β , при справедливости H_1 , то справедливо неравенство [7]:

$$\beta \leq (1 - \alpha) \cdot B \quad (4)$$

или

$$B \geq \frac{\beta}{1 - \alpha} \quad (5)$$

Следовательно, $\frac{\beta}{1 - \alpha}$ является нижней границей для B .

Однако определение лишь предельных границ ограничительных констант недостаточно для их практического использования. Обозначим действительные значения ограничительных констант следующим образом:

$$A(\alpha, \beta) \leq \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (6)$$

$$B(\alpha, \beta) \geq \frac{\beta}{1 - \alpha}. \quad (7)$$

Далее выразим максимально возможное значение константы A через

$$A = \frac{1 - \beta}{\alpha} = a(\alpha, \beta), \text{ а минимально возможное}$$

$$\text{значение константы } B, \text{ как } B = \frac{\beta}{1 - \alpha} = b(\alpha, \beta).$$

Из (6) и (7) следует, что величина $a(\alpha, \beta)$, выбранная для A , больше или равна точному значению $A(\alpha, \beta)$ и величина $b(\alpha, \beta)$, меньше или равна точному значению $B(\alpha, \beta)$. Замена $A(\alpha, \beta)$ на $A = a(\alpha, \beta)$ и $B(\alpha, \beta)$ на $B = b(\alpha, \beta)$ приведёт к изменению вероятностей ошибок первого и второго рода. Если положить A равным величине, большей $A(\alpha, \beta)$, и положить B равным величине $B(\alpha, \beta)$, то полученная вероятность ошибки первого рода будет несколько меньше α , но вероятность ошибки второго рода будет несколько больше β . Подобно этому, если использовать для A точное значение $A(\alpha, \beta)$, а для величины B , значение ниже точного $B(\alpha, \beta)$, то вероятность ошибки второго рода будет меньше β . То есть если используемая величина A выше точного значения $A(\alpha, \beta)$, а величина B ниже точного значения $B(\alpha, \beta)$, то неясно, какими получатся в результате этого ошибки первого и второго рода. Обозначим через α^l и β^l результирующие вероятности ошибок первого и второго рода при $A = a(\alpha, \beta)$ и $B = b(\alpha, \beta)$. Тогда с учётом (3) и (5) получим:

$$\frac{\alpha^l}{1 - \beta^l} \leq \frac{1}{a(\alpha, \beta)} = \frac{\alpha}{1 - \beta} \quad (8)$$

и

$$\frac{\beta^l}{1 - \alpha^l} \leq b(\alpha, \beta) = \frac{\beta}{1 - \alpha}. \quad (9)$$

Из этих неравенств следует, что

$$\alpha^l \leq \frac{\alpha}{1 - \beta} \quad (10)$$

$$\beta^l \leq \frac{\beta}{1 - \alpha}. \quad (11)$$

Умножая (8) на $(1 - \beta)(1 - \beta^l)$, (9) на $(1 - \alpha)(1 - \alpha^l)$ и складывая полученные неравенства, имеем:

$$\alpha^l + \beta^l \leq \alpha + \beta. \quad (12)$$

Неравенства (10), (11) и (12) дают важные верхние оценки для α^l и β^l [8]. Как правило величины α и β бывают малыми и обычно находятся в диапазоне от 0,01 до 0,05. Таким образом, $\frac{\alpha}{1-\beta}$ и $\frac{\beta}{1-\alpha}$ будут достаточно близки к α и β соответственно. Из (10) и (11) видно, что величины, на которые α^l может превосходить α и β^l может превосходить β , являются достаточно малыми и для всех практических целей ими можно пренебречь. Более того, (12) показывает, что по крайней мере одно из неравенств $(\alpha^l \leq \alpha)$ и $(\beta^l \leq \beta)$ должно выполняться точно. Другими словами, при использовании $a(\alpha, \beta)$ и $b(\alpha, \beta)$ вместо $A(\alpha, \beta)$ и $B(\alpha, \beta)$ может произойти увеличение, не более одной вероятности α или β .

Таким образом, можно сделать следующий вывод: использование $a(\alpha, \beta)$ и $b(\alpha, \beta)$ вместо $A(\alpha, \beta)$ и $B(\alpha, \beta)$ не вызывает существенного изменения α или β . То есть при непосредственной реализации критерий, использующий $A = a(\alpha, \beta)$ и $B = b(\alpha, \beta)$, обеспечивает по крайней мере такую же защиту от негативного решения, как и критерий $A = A(\alpha, \beta)$ и $B = B(\alpha, \beta)$.

Теперь необходимо рассмотреть последствия возможного существенного уменьшения α и β при использовании $a(\alpha, \beta)$ и $b(\alpha, \beta)$ вместо $A(\alpha, \beta)$ и $B(\alpha, \beta)$. Если бы это было так, то это означало бы, что критерий $A = a(\alpha, \beta)$ и $B = b(\alpha, \beta)$ обеспечивает лучшую гарантию против неправильного решения, чем критерий $A = A(\alpha, \beta)$ и $B = B(\alpha, \beta)$. Таким образом, единственный ущерб, который может появиться в результате использования $a(\alpha, \beta)$ и $b(\alpha, \beta)$ вместо $A(\alpha, \beta)$ и $B(\alpha, \beta)$ заключается в том, что это может привести к заметному увеличению числа наблюдений, требуемых в критерии. Действительно, так как $a(\alpha, \beta) \geq A(\alpha, \beta)$ и $b(\alpha, \beta) \geq B(\alpha, \beta)$, то число наблюдений, необходимых в критерии $A = a(\alpha, \beta)$ и $B = b(\alpha, \beta)$ никогда не будет меньше числа наблюдений, необходимых в критерии с $A = A(\alpha, \beta)$ и $B = B(\alpha, \beta)$. В случае с выделением сегментов обработки речи увеличение числа наблюдений соответствует процессу расширения сегмента анализа. И с учётом предельного ограничения в соответствии с международным стандартом электро-

связи не имеет практического значения. Следовательно, определение точных значений $A(\alpha, \beta)$ и $B(\alpha, \beta)$ не представляет большого интереса.

Таким образом, для всех практических случаев справедливо следующее правило идентификации ограничительных констант:

$$A = \frac{1-\beta}{\alpha} \quad (13)$$

и

$$B = \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (14)$$

Теперь необходимо определиться с величинами ошибок первого и второго рода при использовании способа выделения сегментов обработки речи на основе последовательного статистического анализа [7]. Существенное влияние на определение данных величин накладывает ограничения на величину сегмента анализа вызванные стандартами МСЭ. Данные ограничения приводят к необходимости останавливать расширение сегмента находящегося в «эффективной» области, в случае достижения им предельного значения в 80 мс. Фактически это соответствует так называемому «усечению» последовательного критерия отношения вероятностей [8]. Данный процесс изменяет действительные значения ошибок первого и второго рода по сравнению с расчетными. Очевидно, что чем ближе к переходу между областями произошла остановка расширения сегмента в результате «усечения», тем меньше влияние на α и β .

Автор критерия последовательного отношения вероятностей А. Вальд в своих исследованиях выяснил влияние «усечения» на заданном числе наблюдений на вероятности ошибок α и β [8]. Из анализа полученных результатов следует, что в случае «усечения» действительная величина ошибки первого рода при её расчетном значении в 0,01 не превысит действительного значения в 0,02. Данная величина вполне приемлема для случая остановки расширения сегмента при возможности его продолжения, т.к. это всего лишь влияет на эффективность кодирования. Сложнее дело обстоит с ошибкой второго рода, т.к. её возникновение не позволяет восстановить сигнал на приёмной стороне с требуемым качеством. Исследования показали, что при расчетном значении $\beta = 0,01$ её действительное значение в результате усечения не превысит 0,02, то есть в двух случаях из ста возможно снижение разборчивости передаваемого речевого сигнала. С учётом требова-

ний, применяемых в системах передачи речи, данное значение вполне допустимо.

Таким образом, расчетные значения ошибок первого и второго рода при использовании способа выделения сегментов следует принимать следующими: $\alpha = 0,01$; $\beta = 0,01$.

В дальнейшем α и β были использованы в расчетах ограничительных констант с учётом (12) и (13). Полученные значения A и B были прологарифмированы по основанию e и использованы в исследованиях поведения ЛСЧ на анализируемых сегментах РС, выделенных с помощью последовательного статистического анализа.

Исследованиями доказано, что ЛСЧ на сегменте анализа, границы которого адаптивно расширены вышеуказанным способом, не претерпевают значительных изменений по отношению к начальному в 20 мс. Данное свойство однородности может быть использовано для

снижения вычислительного ресурса затрачиваемого для определения параметров предсказания, а также количества бит, выделяемых для их кодирования.

Алгоритм обработки при переменной длительности сегмента анализа

Анализ результатов исследований, приведённых на рис. 1, показал, что отклонение ЛСЧ от значений, вычисленных на начальных сегментах, не превышает величину шага квантования (горизонтальная линия).

Это свойство сохраняется на протяжении большем, чем максимально возможный размер анализируемого сегмента (80 мс, Рекомендации G.114 Международного союза электросвязи - вертикальная линия).

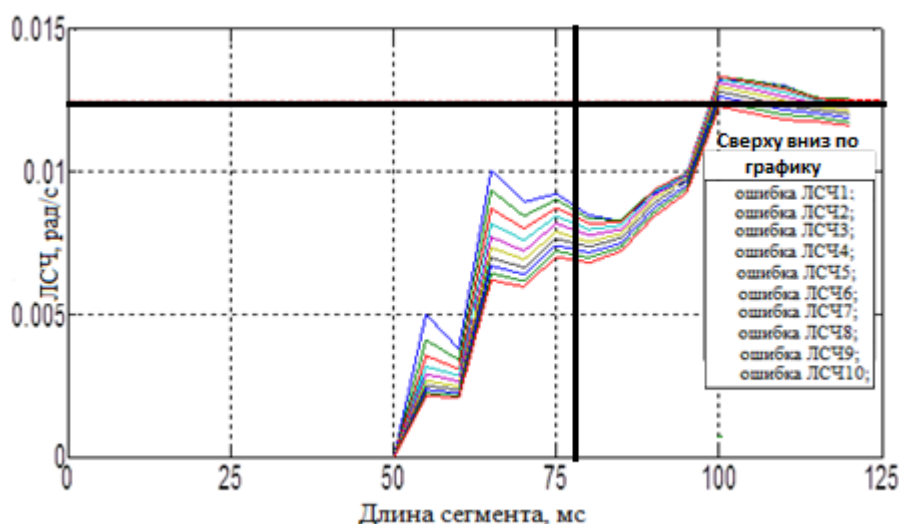


Рис. 1. Отклонения (ошибки) ЛСЧ на однородных сегментах по отношению к начальному

Данное обстоятельство позволяет выработать подходы к формированию данных для кодирования сегмента РС, с сохранением параметров предсказания на всём протяжении участка РС одинаковой природы образования. Разработанные подходы могут быть внедрены в устройства обработки речевого сигнала на основе линейного предсказания, функционирующие в составе систем, ориентированных на протоколы с переменными скоростями, и отличающиеся применением высокоскоростных мультиплексоров потоков с переменной скоростью.

Алгоритм реализации предлагаемого решения представлен на рис. 2.

С целью подтверждения полученных аналитическим путём заключений о возможности использования параметров предсказания, выде-

ленных на начальных участках, для восстановления расширенного сегмента было проведено имитационное моделирование в среде Matlab.

Для анализа были представлены 4 набора отсчётов речевого сигнала длительностью от 18000 до 23000 отсчётов, полученные цифровой дискретизацией с частотой 8 кГц. Данные наборы подвергались обработке по двум сценариям:

1. Сегментирование по 20 мс, с выделением параметров предсказания и восстановление с возбуждением белым гауссовым шумом (БГШ).

2. Выделение сегментов с помощью последовательного статистического анализа и восстановление сигнала по параметрам предсказания, рассчитанным на начальных (20 мс) сегментах, с возбуждением от БГШ.

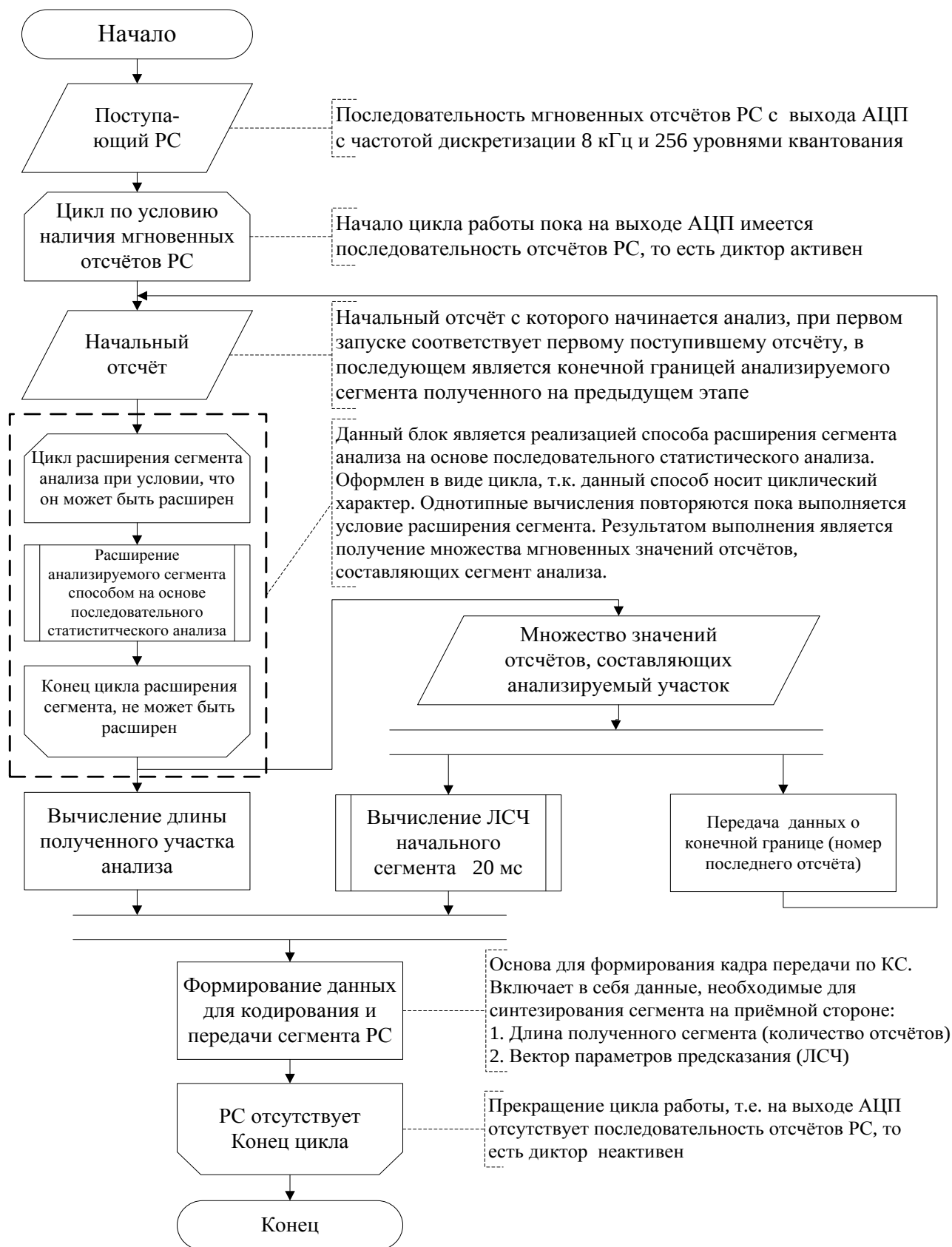


Рис. 2. Алгоритм формирования данных для кодирования и передачи сегмента РС в речепреобразующих устройствах с переменной скоростью передачи

Во время имитационного моделирования проводилось сравнение следующих показателей, рассчитанных по обоим сценариям:

- объем данных, необходимых для восстановления каждого набора отсчетов;
- качество звучания восстановленного речевого сигнала.

При этом были применены следующие ограничения и допущения:

1. Объем информации, необходимой для передачи одного сегмента анализа является одинаковым для обоих сценариев.

2. Дополнительными данными, необходимыми для выполнения 2-го сценария, является только информация о количестве отсчетов, составляющих анализируемый сегмент.

Для получения количественных оценок объем данных, составляющих кадр передачи, был принят в соответствии с алгоритмом низкоскоростного кодирования на основе линейного предсказания с долговременным многоимпульсным возбуждением (LPC-LTP-MPE), что составляет 192 бита на сегмент длиной 20 мс.

С учетом предельного значения длины анализируемого сегмента, накладываемого требованиями Международного союза электросвязи (МСЭ), объем L не превышает значения 640. При проведении эксперимента использовалось максимально возможное значение L . Для передачи данного значения по цифровым каналам связи необходимо 10 бит.

В результате произведённого моделирования были получены следующие оценки отношения объема информации, необходимой к передаче для синтеза набора отсчетов (бит), к длительности сигнала, получаемого при обратном цифро-аналоговом преобразовании (с). Размерность полученных результатов (бит/с) позволяет считать их приближенными оценками скоростей кодирования для соответствующих сценариев моделирования. Результаты представлены в таблице.

Результаты моделирования

Наборы отсчетов	Скорость кодирования по сценарию 1, бит/с	Средняя скорость кодирования по сценарию 2, бит/с
Набор 1	9600	8446
Набор 2	9600	8322
Набор 3	9600	8258
Набор 4	9600	8446

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что переход к переменным ско-

ростям кодирования речи с использованием описанного в данной статье алгоритма приводит к снижению средней скорости кодирования не менее чем на 12 %, по отношению к существующим алгоритмам кодирования с фиксированными сегментами анализа речевого сигнала при переменной длительности сегмента анализа.

Заключение

В работе предложен подход к оценке ограничительных констант, необходимых для функционирования способа выделения сегмента речи с динамически изменяющимися границами. Данный подход ориентирован на системы передачи данных, функционирующие по протоколам с переменными скоростями с помощью «коммутации пакетов».

Представлен разработанный алгоритм обработки речевого сигнала при переменной длительности сегмента анализа. Приведены результаты моделирования. По результатам эксперимента сделаны выводы о снижении средней скорости кодирования речевого сигнала при использовании сегмента анализа переменной длины.

Литература

1. Быков С.Ф., Журавлев В.И., Шалимов И.А. Цифровая телефония: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2003. 144 с.
2. Рекомендации ITU-T G.729 «Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction (CS-ACELP)», Женева, 1996.
3. Шалимов И.А. Теоретико-информационные принципы компрессии речевого сигнала на основе его квазипериодических свойств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.17. М., 2005. 241 с.
4. Иванов В.Н. Вычисление линейных спектральных частот // Электросвязь. 1997. № 6. С. 25–27.
5. Ланнэ А.А., Улахович Д.А. Передача информации о состоянии фильтра-предсказателя с помощью спектральных пар // Радиоэлектроника и связь. 1991. № 1. С. 37 – 43.
6. Ланнэ А.А. Новая теория линейных спектральных корней // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды 3-й Междунар. конф. М., 2000. С. 118 – 125.
7. Вальд Абрахам. Последовательный статистический анализ; под ред. А.Ф. Лапко, М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. 328 с.
8. Пат. 2684576 Российская Федерация, МПК G 10 L 19/022 (2013.01) / СПК G 10 L 19/022 (2018.08). Способ выделения сегментов обработки речи на основе последовательного статистического анализа / Власов Р. С., Кисляк А. А., Титов О. Н., Любимов Д. В.; заявитель и патентообладатель Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. № 2018103835; заявл. 31.01.2018; опубл. 09.04.2019, Бюл. № 10. 20 с.

Информация об авторах

Афанасьев Андрей Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (302034, Россия, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35), e-mail: fromnet@yandex.ru, тел. 8-4862-54-98-90.

Власов Роман Сергеевич – адъюнкт, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (302034, Россия, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35), e-mail: vlasrv@mail.ru, тел. 8-4862-54-98-90

Лисичкин Владимир Георгиевич – д-р техн. наук, доцент, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (302034, Россия, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35), e-mail: lisichkin-vg@rambler.ru, тел. 8-4862-54-98-90

Питолин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Московский проспект, д. 14), e-mail: pitol@mail.ru, тел. 8-473-243-77-04

**SPEECH SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS
AT VARIABLE DURATION OF THE ANALYSIS SEGMENT**

A.A. Afanas'ev¹, R.S. Vlasov¹, V.G. Lisichkin¹, A.V. Pitolin²

¹**Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation, Orel, Russia**

²**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

Abstract: the materials on the study of such speech signal properties as homogeneity (similarity) of the distribution of instantaneous sample values are presented. This property is used in the method of selecting speech processing segments based on sequential statistical analysis. This approach focuses on linear prediction-based speech coding systems. Prediction parameters are linear spectral frequencies. The consistent statistics methods used in analyzing a segment of speech require the validity of the restrictive constants necessary to make a decision about the expansion of a segment. These constants are calculated on the basis of errors of the first and second kind, taking into account the requirements imposed on speech transmission systems. The linear spectral frequencies calculated at each expansion step undergo minor (within the quantization step) changes with respect to the initial segment. This fact makes it possible to use the results of the analysis of the initial section to restore the section extended by the above method, which can significantly reduce both the computational complexity and the coding rate of the speech signal. At the same time, it is necessary to take into account the requirements of the standards for algorithmic delays in speech processing, which limit the maximum possible segment of the analyzed data along the length

Key words: speech signal, analysis segment, linear spectral frequencies, quantization step, segment expansion

References

1. Bykov S.F., Zhuravlyev V I., Shalimov I.A. "Digital telephony: manual" ("Tsifrovaya telefoniya: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, Radio i svyaz', 2003, 144 p.
2. Recommendations of ITU-T G.729 "Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction (CS-ACELP)", Geneva, 1996.
3. Shalimov I.A. "Theoretical and information principles of a compression of a speech signal on the basis of its quasiperiodic properties" ("Teoretiko-informatsionnye printsipy kompressii rechevogo signala na osnove ego kvazi-periodicheskikh svoystv"), Dr. of Technical Sc. diss., Moscow, 2005, RGB ODES, 71:06-5/528, 241p.
4. Ivanov V.N. "Estimation linear spectral frequencies", *Telecommunication (Elektrosvyaz')*, 1997, no. 6, pp. 25-27.
5. Lanne A.A., Ulakhovich D.A. "Information transfer about a filter predictor status by means of linear spectral pairs", *Radio electronics and communication (Radioelektronika i svyaz')*, 1991, no.1, pp. 37-43.
6. Lanne A.A. "New theory of linear spectral roots", *Digital signals processing and its application: proc. of the 3rd International conference (Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye: trudy 3-y Mezhdunar. konf.)*, Moscow, 2000, pp. 118-125.
7. Vald A. "Consecutive statistical analysis" ("Posledovatel'nyy statisticheskiy analiz"), Moscow, State publishing house of physical and mathematical literature, 1960, 328 p.
8. Vlasov R.S., Kislyak A.A., Titov O.N., Lyubimov D.V. "A method for selecting segments of speech processing based on sequential statistical analysis" ("Sposob vydeleniya segmentov obrabotki rechi na osnove posledovatel'nogo statisticheskogo analiza"), patent 2684576 of the Russian Federation, IPC G 10 L 19/022 (2013.01) / SEC G 10 L 19/022 (2018.08), bull. 10, 20 p.

Submitted 04.06.2019; revised 31.07.2019

Information about the authors

Andrey A. Afanasyev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Academy of FSS of Russia (35 Priborostraitelnaya str., Orel, 302034, Russia), e-mail: fromnet@yandex.ru, tel. 8-4862-54-98-90

Roman S. Vlasov, Graduate student, Academy of FSS of Russia (35 Priborostraitelnaya str., Orel 302034, Russia), e-mail: vlasrv@mail.ru, tel. 8-4862-54-98-90

Vladimir G. Lisichkin, Dr. Sc. (Technical), Associate professor, Academy of FSS of Russia (35 Priborostraitelnaya str., Orel, 302034, Russia), e-mail: lisichkin-vg@rambler.ru, tel. 8-4862-54-98-90

Andrey V. Pitolin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pitol@mail.ru, tel. 8-473-243-77-04

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗВЕШЕННОЙ ОЦЕНКИ КАНАЛА РАДИОСВЯЗИ
ДЛЯ МНОГОАНТЕННЫХ OFDM-СИСТЕМ****О.Н. Чирков****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассматриваются современные помехоустойчивые способы оценки радиоканала связи в высокоскоростных стандартах передачи данных LTE, использующих ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием. Проведен анализ методов повышения эффективности алгоритмов оценки каналов радиосвязи, основанной на пилотных сигналах. Предложена математическая модель взвешенной оценки канала радиосвязи для систем с ортогональным частотным уплотнением каналов с множеством приемных и передающих антенн. Приведена блок-схема взвешенной итерационной оценки радиоканала MIMO OFDM-системы, основанная на оптимизированных весовых коэффициентах для систем множественного доступа с частотным разделением каналов с одной несущей. Проведено моделирование LTE системы связи с двумя передающими антеннами на базовой станции и двумя приемными антеннами в стандарте EUTRA. Результаты моделирования показали, что предложенная модель позволяет обеспечить улучшение характеристик среднеквадратичной ошибки приема MSE и блочной ошибки BLER по сравнению с пилотным оценщиком. Экспериментальным путем показано, что для достижения почти оптимальной производительности предложенной взвешенной итерационной оценки радиоканала достаточно использовать 3 итерации. Выигрыш в эффективности MSE-характеристики до 5 дБ, улучшение BLER ошибки – 2 дБ

Ключевые слова: оценка канала, пилотный сигнал, взвешенная оценка, итерация, весовые коэффициенты

Введение

В современных системах высокоскоростной беспроводной мобильной связи широкополосный радиоканал избирателен как по времени, так и по частоте. Для помехоустойчивого восстановления полезной информации необходима точная оценка замирающего радиоканала. В высокоскоростных стандартах удаленного доступа LTE, LTE-A для оценки канала связи используют пилотные сигналы – специальные символы с заданной амплитудно-фазовой характеристикой. Однако пилотная оценка снижает эффективность в условиях многопользовательских систем передачи данных.

Для повышения помехоустойчивости систем беспроводного обмена информацией с множеством пользователей применяют итеративные способы оценки символов данных [1]. В работе [2] предложен оценщик на основе предварительных (взвешенных) оценок информационных символов для систем множественного доступа с частотным разделением каналов с одной несущей (SC-FDMA).

Весовые коэффициенты, оптимизированные в [2] для SC-FDMA модуляции, будут эффективными и для ортогонального частотного разделения каналов с мультиплексированием (OFDM) [7]. Покажем, что применение рассчитанных весов позволит достичь значительного

улучшения производительности OFDM-систем с множеством входов и выходов (MIMO).

Постановка задачи

Рассмотрим многоантенную систему с ортогональным частотным уплотнением каналов. Представим принятый сигнал на антенне r в виде вектора

$$\mathbf{z}_r = \sum_{k=1}^{N_t} \mathbf{S}_k \mathbf{h}_{r,k} + \mathbf{n}_r, \quad r = 1, \dots, N_r, \quad (1)$$

где N – общее количество символов данных; N_t – количество передающих антенн, $\mathbf{S}_k$ – $N \times N$ диагональная матрица информационных и пилотных символов от k -й передающей антенны; $\mathbf{h}_{r,k}$ – отклик канала между k -й передающей и r -й приемными антеннами; $\mathbf{n}_r$ – комплексный вектор шума; N_r – количество приемных антенн. Предположим, что вектор канала $\mathbf{h}_{r,k}$ представлен в виде $M \times 1$ вектора $\mathbf{a}_{r,k}$ с коэффициентами расширения $\mathbf{B}$:

$$\mathbf{h}_{r,k} = \mathbf{B} \mathbf{a}_{r,k}. \quad (2)$$

$\mathbf{B}$ это матрица $M \times N$. Символы $\mathbf{S}_k$ точно неизвестны, поэтому в (1) введем ошибку $\mathbf{E}_k$:

$$\mathbf{z}_r = \sum_{k=1}^{N_t} \bar{\mathbf{S}}_k \mathbf{h}_{r,k} + \sum_{k=1}^{N_t} \mathbf{E}_k \mathbf{h}_{r,k} + \mathbf{n}_r, \quad (3)$$

где $\bar{\mathbf{S}}_k$ – диагональная матрица взвешенных информационных и пилотных символов.

Для систем множественного доступа с частотным разделением каналов с одной несущей функция плотности вероятности принятого (максимум правдоподобия [6]) сигнала запишется в виде [2]:

$$p(\mathbf{z}_r|\mathbf{a}) = \frac{e^{-\mathbf{y}_r^H \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{y}_r}}{\pi^N \det(\mathbf{R}_y)}, \quad (4)$$

где $\mathbf{R}_y = \mathbb{E}[\mathbf{y}_r \mathbf{y}_r^H]$ – ковариационная матрица ошибки и шума, символ $(\cdot)^H$ – сопряженное транспонирование.

Взвешенная оценка канала радиосвязи

Пересмотрим алгоритм взвешенной оценки [2] Гауссовой модели (4) для OFDM модуляции. Задача оценки радиоканала может быть представлена как логарифмическая функция максимума правдоподобия $\ln[p(\mathbf{z}_r|\mathbf{a})]$ из (4) при некоторых ограничениях A :

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \max_{\mathbf{a} \in A} \ln[p(\mathbf{z}_r|\mathbf{a})], \quad (5)$$

где A – множество ограничений на вектор $\mathbf{a}$. Например, для линейной оценки минимального среднеквадратичного отклонения (LMMSE) коэффициенты разложения $\mathbf{a}$ предполагаются Гауссовыми с нулевым средним и ковариационной матрицей $\mathbf{R}_a = \mathbb{E}[\mathbf{a} \mathbf{a}^H]$. Используя выражение (4) и логарифмическую функцию правдоподобия (5), взвешенная оценка радиоканала может быть задана как [2]:

$$\ln[p(\mathbf{z}_r|\mathbf{a})] = -N \ln[\pi] - \ln[\det(\mathbf{R}_y)] - \mathbf{y}_r^H \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{y}_r. \quad (6)$$

Определим

$$\eta_{r,i} = \sum_{k=1}^{N_t} \left| h_{r,k}^{(i)} \right|^2 \frac{\sigma_k^2}{\sigma_n^2}. \quad (7)$$

$$l_{r,i} = \frac{1}{\sigma_n^2} \left| z_{r,i} - \sum_{k=1}^{N_t} h_{r,k}^{(i)} s_{k,i} \right|^2. \quad (8)$$

Отсюда

$$\ln[\det(\mathbf{R}_y)] = N \ln[\sigma_n^2] + \sum_{k=1}^{N_t} \ln[\eta_{r,i} + 1] \quad (9)$$

$$\mathbf{y}_r^H \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{y}_r = \sum_{i=1}^N \frac{l_{r,i}}{\eta_{r,i} + 1}, \quad (10)$$

где $h_{r,k}^{(i)}$ – i -й элемент вектора радиоканала $\mathbf{h}_{r,k}$; $z_{r,i}$ – i -й элемент вектора принятого сигнала

$\mathbf{z}_r$; $s_{k,i}$ – i -й элемент $\mathbf{s}_k$. Тогда (6) запишется в виде

$$\ln[p(\mathbf{z}_r|\mathbf{a})] = -N \ln[\pi] - N \ln[\sigma_n^2] - \sum_{i=1}^{N_t} \ln[\eta_{r,i} + 1] - \sum_{i=1}^N \frac{l_{r,i}}{\eta_{r,i} + 1}. \quad (11)$$

Значение $(-N \ln[\pi] - N \ln[\sigma_n^2])$ не влияет на оптимизацию, значит:

$$\ln[p(\mathbf{z}_r|\mathbf{a})] = - \sum_{i=1}^N (\ln[\eta_{r,i} + 1] + \frac{l_{r,i}}{\eta_{r,i} + 1}). \quad (12)$$

Отсюда задача (5) может быть переписана как [2]:

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a} \in A} \sum_{i=1}^N (\ln[\eta_{r,i} + 1] + \frac{l_{r,i}}{\eta_{r,i} + 1}). \quad (13)$$

Значение $\eta_{r,i}$ представляет собой отношение мощностей ошибок информационных данных и шумовой составляющей для i -го элемента данных r -й приемной антенны. Следует отметить, что если $\eta_{r,i} = 0$, то передаваемые данные полностью известны в приемном тракте, и от (13) мы приходим к традиционному (невзвешенному) оценщику LMMSE, основанному на пилот-сигналах:

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \max_{\mathbf{a} \in A} \sum_{i=1}^N l_i.$$

Перепишем задачу (13) с учетом оптимизации по $\eta_{r,i}$:

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a} \in A} \min_{\eta_{r,i}} \sum_{i=1}^N \Lambda(\eta_{r,i}, l_{r,i}), \quad (14)$$

где

$$\Lambda(\eta_{r,i}, l_{r,i}) = (\ln[\eta_{r,i} + 1] + \frac{l_{r,i}}{\eta_{r,i} + 1}). \quad (15)$$

Математическая модель взвешенной оптимизации (14) запишется в виде:

$$\Lambda(\eta_{r,i}, l_{r,i}) = \omega_{r,i} l_{r,i}. \quad (16)$$

Веса $\omega_{r,i}$ задаются [2]:

$$\omega_{r,i} = \frac{\ln[\eta_{r,i} + 1]}{l_{r,i}} + \frac{1}{\eta_{r,i} + 1}. \quad (17)$$

Используя $\eta_{r,i} = l_{r,i} - 1$ в (17), упростим

$$\omega_{r,i} = \frac{\ln[l_{r,i}] + 1}{l_{r,i}}. \quad (18)$$

В итоге весовые коэффициенты

$$\omega_{r,i} = \begin{cases} 1, & l_{r,i} \leq 1 \\ \frac{\ln[l_{r,i}] + 1}{l_{r,i}}, & l_{r,i} > 1 \end{cases} \quad (19)$$

На рис. 1 приведено графическое соотношение между весами $\omega_{r,i}$ и остаточными степенями $l_{r,i}$.

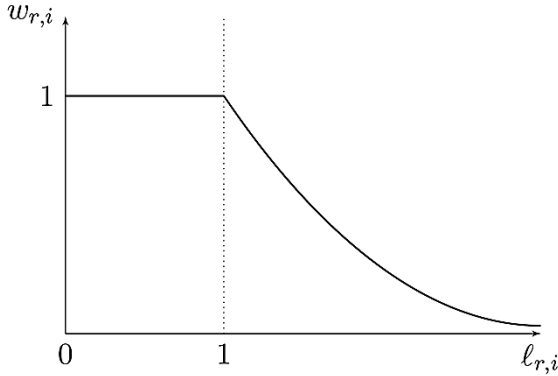


Рис. 1. Соотношение между весами $\omega_{r,i}$ и остаточными степенями $l_{r,i}$

Задача оценки (14) может быть решена итеративно с использованием весов на каждой итерации:

$$\hat{\omega}_{r,i} = \begin{cases} 1, & \hat{l}_{r,i} \leq 1 \\ \frac{\ln[\hat{l}_{r,i}] + 1}{\hat{l}_{r,i}}, & \hat{l}_{r,i} > 1 \end{cases} \quad (20)$$

где

$$\hat{l}_{r,i} = \frac{1}{\sigma_n^2} \left| z_{r,i} - \sum_{k=1}^{N_t} \hat{h}_{r,k}^{(i)} \bar{s}_{k,i} \right|^2 \quad (21)$$

Полученную модель для взвешенной итеративной оценки канала можно использовать в приемном тракте многоантенной (MIMO) OFDM-системы.

Взвешенная итеративная оценка канала

На рис. 2 представлена блок-схема предложенного взвешенного итерационного оценщика радиоканала высокоскоростных систем удаленного доступа, использующих OFDM модуляцию и многоантенную передачу данных MIMO.

На первом этапе канал связи оценивается классическим способом по пилотным сигналам (например, линейным методом наименьших квадратов LS [3]) $\hat{\mathbf{h}}_{r,k}$. С использованием начальных оценок канала $\hat{\mathbf{h}}_{r,k}$ в линейном детекторе минимальных среднеквадратичных отклонений (MMSE) для технологии MIMO по-

лучают предварительные оценки информационных данных $\hat{\mathbf{S}}_k$. Далее в блоке квадратурной модуляции QAM [4] восстанавливаются предварительные информационные символы $\bar{\mathbf{S}}_k$. На следующем этапе вычисляются весовые коэффициенты по формулам (20, 21). После чего по оценкам $\hat{\mathbf{h}}_{r,k}$ и $\bar{\mathbf{S}}_k$ восстанавливается транслируемый сигнал $\hat{\mathbf{z}}_{r,k}$, соответствующий k -ой передающей антенне:

$$\hat{\mathbf{z}}_{r,k} = \mathbf{z}_r - \sum_{q=1, q \neq k}^{N_t} \bar{\mathbf{s}}_q \hat{\mathbf{h}}_{r,q}, \quad (22)$$

где N_t – количество передающих системы MIMO.

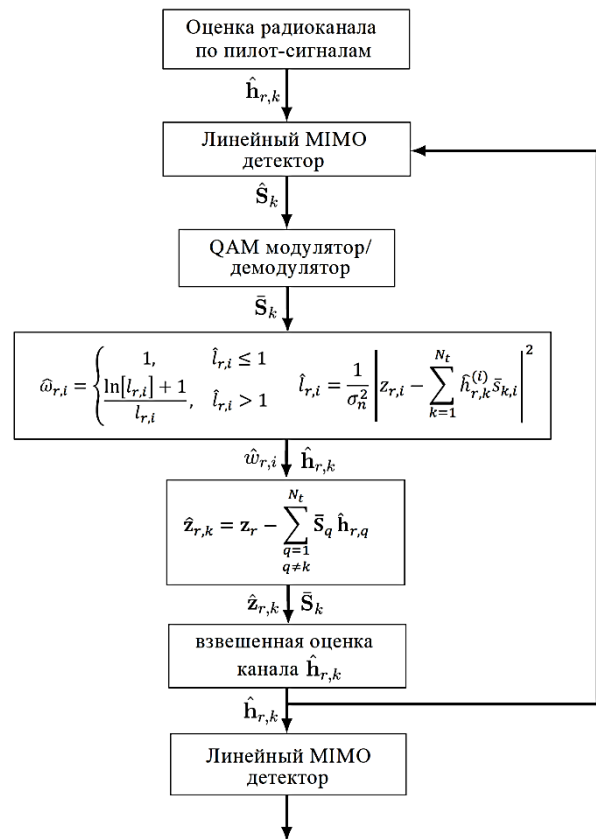


Рис. 2. Блок-схема взвешенной итерационной оценки радиоканала MIMO OFDM-системы

Далее веса $\hat{\omega}_{r,i}$ используются для повторной (взвешенной) оценки радиоканала $\hat{\mathbf{h}}_{r,k}$ в блоке линейной оценки минимального среднеквадратичного отклонения LMMSE. Обновленные оценки канала связи используются в следующей итерации. Далее методика повторяется, пока не будет восстановлен весь сигнал с заданной помехоустойчивостью. Моделирование показало, что для высокой эффективности предложенной модели взвешенной оценки достаточно 3-х итераций рис. 4-5.

Моделирование

Для моделирования рассмотрим однопользовательскую LTE систему связи [5] с двумя передающими антеннами на базовой станции и двумя приемными антеннами в городских условиях. Один подкадр состоит из двух слотов с 7-ю OFDM-символами в каждом слоте – рис. 3. Информационный блок занимает один слот из 7 OFDM-символов во времени и 12 поднесущих по частоте ($N = 14 \times 12 = 504$ символа, из которых 24 символа являются пилот-сигналами) [5].

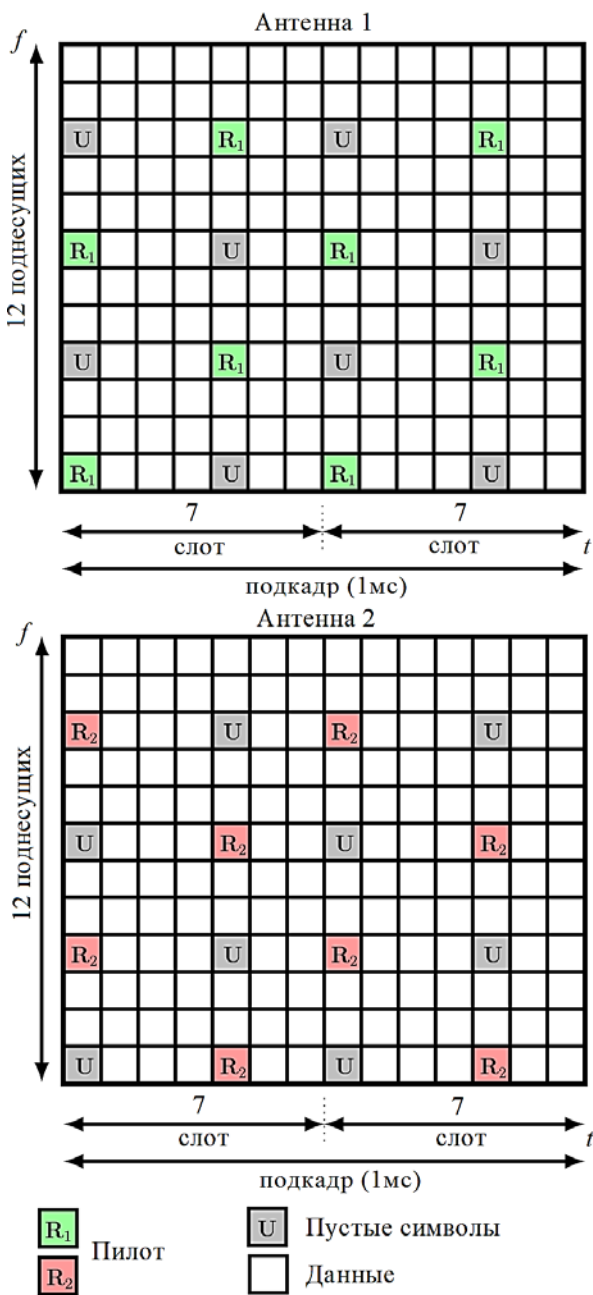


Рис. 3. Структура подкадра LTE системы с 2-мя передающими антеннами

Другие параметры моделирования представлены в таблице [5].

Для наглядного представления эффективности предложенной модели взвешенной итерационной оценки радиоканала используются среднеквадратичные зависимости ошибки (MSE) от отношения сигнал/шум (SNR).

Коэффициент блочных ошибок (BLER) рассчитывается как отношение количества принятых блоков с ошибками (по крайней мере, с одной) к общему количеству переданных подкадров.

Параметры моделирования

Пропускная способность канала	5 МГц
Частота дискретизации	7,68 МГц
Длина слота	0,5 мс
Количество поднесущих	36
Интервал между двумя поднесущими	15 кГц
Вид модуляции	16-QAM
Размер БПФ	512
Доплеровская частота	350 Гц
Профиль задержки	ETU
Скорость кодирования	1/3

На рис. 4 показана сравнительная характеристика среднеквадратичной ошибки от отношения сигнал/шум предложенных итеративных взвешенных оценок канала беспроводной связи с начальной пилотной оценкой в типичном городском радиоканале ETU на доплеровской частоте 350 Гц. Производительность взвешенной оценки лучше на 3–5 дБ. Разница в производительности взвешенной оценки между 3 и 10 итерациями крайне мала. Таким образом, достаточно использовать 3 итерации для достижения почти оптимальной производительности.

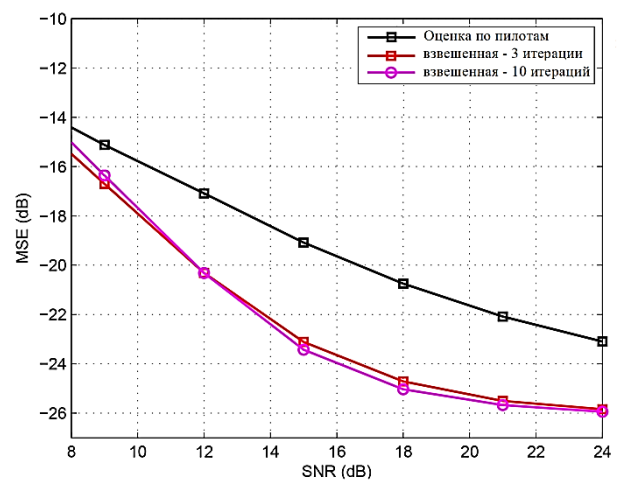


Рис. 4. MSE характеристика с городским профилем задержки сигнала (ETU), доплеровская частота 350 Гц

На рис. 5 представлены показатели блочной ошибки BLER в приемниках с взвешенными и не взвешенными оценщиками каналов для стандарта EUTRA. Характеристика известного канала - истинный отклик в MIMO-детекторе. Улучшение производительности итерационной оценки с весовыми коэффициентами по сравнению с не взвешенной незначительно. Однако итеративная оценка радиоканала многоантенных OFDM-систем эффективнее стандартной пилотной оценки до 2 дБ.

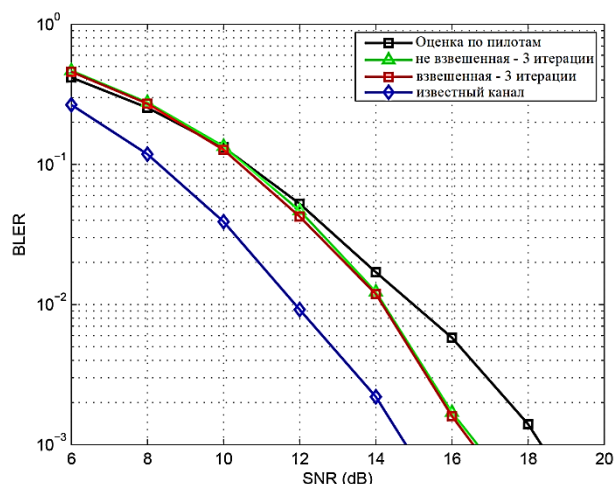


Рис. 5. BLER характеристика с городским профилем задержки сигнала (ETU), доплеровская частота 350 Гц

Заключение

В статье предложена математическая модель взвешенной оценки канала радиосвязи для многоантенных OFDM-систем. Для оценщика использованы оптимизированные весовые коэффициенты [2] для систем множественного доступа с частотным разделением каналов с одной несущей стандарта LTE. Результаты моделирования показали, что такие веса могут обеспечить улучшение среднеквадратичной

ошибки при оценке радиоканала по сравнению с оценкой по пилотным сигналам до 5 дБ. Приведена блок-схема модели взвешенной оценки радиоканала MIMO OFDM-системы итерационным методом. Посредством моделирования показано, что для EUTRA радиоканалов связи [5] взвешенная итерационная оценка с весами из [2] превосходит не взвешенный пилотный оценщик по параметрам блочной ошибки BLER до 2 дБ. Также отмечено, что для достижения высокой производительности предложенной модели достаточно 3-х итераций.

Литература

1. Rossi Salvo P. and Muller R. Joint twofold-iterative channel estimation and multiuser detection for MIMO-OFDM systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2008. Vol. 7. № 11. Pp. 4719-4729.
2. Zakharov Y. and Delai Z. Weighted LS multiuser channel estimation for LTE // in 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Stockholm, Sweden, Jun. 2015. Pp. 405-409.
3. Чирков О.Н., Свиридова И.В., Бобылкин И.С. Оптимизация оценки многолучевого канала радиосвязи с OFDM // Труды международного симпозиума надежность и качество. Пенза: Пензенский государственный университет, 2018. Т. 2. С. 131-133.
4. Чирков О.Н. Оценка пропускной способности высокоскоростных видов модуляции M-QAM // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 6. С. 12-13.
5. ETSI-TS-136-201, 3rd Generation Partnership Project; Technical specification group radio access network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (3GPP TS 36.211, V12.3.0, Release 12), Sep. 2014.
6. Чирков О.Н. Повышение помехоустойчивости высокоскоростной беспроводной системы обмена информацией WI-FI // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 3. С. 66-67.
7. Чирков О.Н. Прямое формирование OFDM сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 5. С. 54-56.

Поступила 16.05.2019; принята к публикации 29.07.2019

Информация об авторах

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

MATHEMATICAL MODEL OF THE WINDOWED RADIO CHANNEL ESTIMATION FOR MULTI-ANTENATE OFDM SYSTEMS

O.N. Chirkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the current noise-tolerant methods of estimating the radio channel of communication in high-speed LTE data transmission standards using orthogonal frequency division multiplexing. The analysis of methods for improving the efficiency of radio communication channel estimation algorithms based on pilot signals was carried out. A mathematical model of a windowed estimate of a radio channel for systems with orthogonal frequency multiplexing of channels with multiple receiving and transmitting antennas is proposed. A block diagram of the weighted iterative evaluation of the MIMO radio channel of the OFDM system is given, based on optimized weighting factors for single-carrier frequency division multiple access systems. The LTE communication system was simulated with two transmitting antennas at the base station and two receiving antennas in the ETU standard. The simulation results showed that the proposed model allows us to provide an improvement in the characteristics of the mean-square MSE reception error and the BLER block error compared with the pilot evaluator. It is experimentally shown that in order to achieve almost optimal performance of the proposed weighted iterative evaluation of the radio channel, it is sufficient to use 3 iterations. The main simulation results and conclusions are given in the conclusion. The gain in MSE performance is up to 5 dB, the improvement in BLER errors is 2 dB

Key words: channel estimation, pilot signals, windowed estimate, iteration, weighting factor

References

1. Salvo Rossi P., Muller R., "Joint twofold-iterative channeling and multiuser detection for MIMO-OFDM systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, vol. 7, no. 11, pp. 4719-4729.
2. Zakharov Y., Delai Z. "Weighted LS" multiuser channeling for LTE", in *2015 IEEE 16th International Workshop on Wireless Communication (SPAWC)*, Stockholm, Sweden, Jun. 2015, pp. 405-409.
3. Chirkov O.N., Sviridov I.V., Bobylkin I.S. "Optimization of the evaluation of a multipath radiocommunication channel with OFDM", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma nadezhnost' i kachestvo)*, Penza State University, 2018, vol. 2, pp. 131-133.
4. Chirkov O.N. "Bandwidth estimation of high-level types of modulation M-QAM", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 6, pp. 12-13.
5. ETSI-TS-136-201, 3rd Generation Partnership Project; Technical specification group radio access network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (3GPP TS 36.211, V12.3.0, Release 12), 2014.
6. Chirkov O.N. "Improving the noise immunity of high-speed wireless information exchange system WI-FI", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 66-67.
7. Chirkov O.N. "Direct formation of OFDM signals", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 5, pp. 54-56.

Submitted 16.05.2019; revised 29.07.2019

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>

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО СЧИТЫВАНИЯ ЭКГ СИГНАЛОВ

Д.В. Журавлев, И.А. Сафонов, И.В. Остроумов, И.С. Анисимов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены особенности разработки системы, предназначенной для бесконтактного считывания медико-биологических показателей (сигналов ЭКГ), путем расчета и моделирования электрической схемы, позволяющей в системе бесконтактного датчика регистрировать биоэлектрические потенциалы организма человека. Электрическая схема обеспечивает максимальное усиление в наиболее выгодных условиях. Если опираться на худшие показатели, амплитуда QRS-комплекса достигнет предела усиления при появлении лучших условий съема биопотенциалов. Емкостные электроды позволят выйти на совершенно новый уровень удобства и комфортабельности использования биомедицинских измерительных приборов в повседневной жизни, а также позволят существенно снизить затраты за счет весьма продолжительного срока использования таких электродов. Активный фильтр, помимо всего прочего, также помогает избавиться от синфазной помехи, наводимой сетью питания. Модель включает непосредственно электрод, обеспечивающий бесконтактное считывание биопотенциалов человека через емкостную связь; буферный каскад, необходимый для согласования приемной части устройства с последующими каскадами; высокочастотный фильтр с требуемой частотой среза; делитель напряжения в качестве смесителя постоянного напряжения на необходимое значение; активный фильтр, служащий для конечного усиления и низкочастотной фильтрации электрического сигнала

Ключевые слова: система бесконтактного считывания медико-биологических показателей, ЭКГ, активный фильтр, емкостный электрод

Введение

Использование липких проводных электродов в повседневной деятельности сопряжено с рядом проблем, решить которые возможно, только отказавшись от указанного типа электродов и применив беспроводные сухие емкостные электроды. Мониторинг ЭКГ посредством емкостного измерения требует специального электрода. В статье рассматривается разработка электрода, состоящего из одного проводящего (медного) слоя. Этот электрод, будучи поднесенным близко к груди субъекта может моделироваться через конденсатор $C_{ЭКВ.}$, значение которого, согласно теории конденсаторов с параллельными пластинами, зависит от расстояния, размера и диэлектрического материала между этими пластинами.

Расчет эквивалентной емкости

Известно, что материалом ткани, через который будет проходить сигнал, является хлопок, обладающий высокой доступностью на рынке и весьма комфортным при использовании в качестве одежды. Диэлектрическая проницаемость данного материала варьируется от 1.3 до 1.4. Толщина же изготавливаемых из хлопка тканей лежит в пределах от 0.16 до 0.6 мм. Большинство одноразовых электродов (се-

ребро/хлорид серебра) для регистрации биопотенциалов обладает размерами от 25 до 60 мм в диаметре.

Таким образом, для расчета эквивалентной емкости, существующей на границе кожа/ткань/электрод, даны необходимые характеристики:

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{ТКАНЬ}} &= 1.3 \dots 1.4, \\ d_{\text{ТКАНЬ}} &= 0.16 \dots 0.6 \text{ мм}, \\ d_{\text{П.Э}} &= 25 \dots 60 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Найдём площадь пластины электрода, используя средний диаметр хлорсеребряного электрода:

$$\begin{aligned}S_{\text{П.Э}} &= \pi \cdot (R_{\text{П.Э}})^2 = \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{П.Э}}}{2}\right)^2 \\ &\approx 1.386 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.\end{aligned}\quad (1)$$

Теперь рассчитаем непосредственно эквивалентную емкость, взяв среднюю толщину хлопковой ткани и ее диэлектрической проницаемости:

$$C_{\text{ЭКВ.}} = \frac{\epsilon_{\text{ТКАНЬ}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{П.Э}}}{d_{\text{ТКАНЬ}}}, \quad (2)$$

где $\epsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная.

$$\begin{aligned}C_{\text{ЭКВ.}} &= \frac{\epsilon_{\text{ТКАНЬ}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{П.Э}}}{d_{\text{ТКАНЬ}}} \\ &\approx 43.577 \text{ пФ}.\end{aligned}\quad (3)$$

Передача энергии и первичная фильтрация

Частотный диапазон принимаемых сигналов находится в пределах от 1 до 150 Гц. Чтобы обеспечить данный диапазон, требуется построение фильтров нижних и верхних частот соответственно. В качестве фильтра верхних частот (рис. 1) будем использовать рассчитанную эквивалентную емкость. Но для составления такого пассивного фильтра необходимо получить сопротивление.

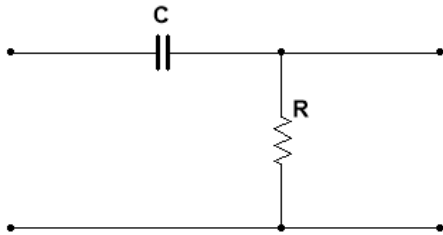


Рис. 1. Фильтр верхних частот

Чтобы получить такой фильтр, а также передать информацию на последующие каскады, воспользуемся операционным усилителем, сконфигурированным как буфер напряжения с единичным коэффициентом усиления (повторитель). Такой операционный усилитель обеспечит согласование по сопротивлению и передачу энергии без значительных потерь.

Используем недорогой, широко доступный операционный усилитель LMP7702, обладающий КМОП-структурой, подходящей для разработки датчиков со сверхвысоким сопротивлением [1].

Для проверки расчетов используем САПР Multisim, проведём построение схемы фильтра верхних частот и буфера и ее амплитудно-частотной характеристики (рис. 2, рис. 3).

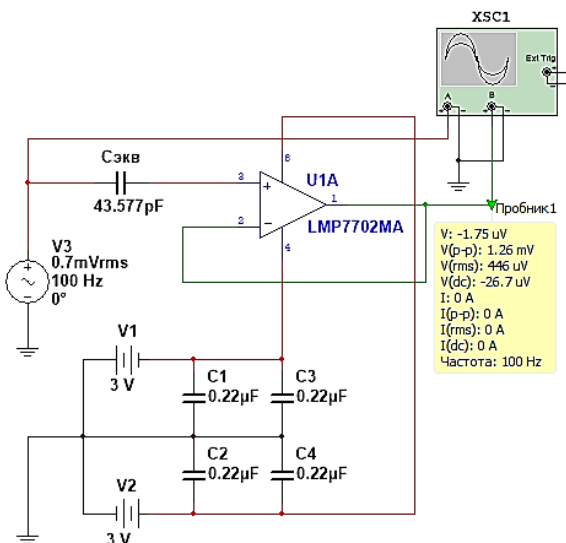


Рис. 2. Моделируемая схема

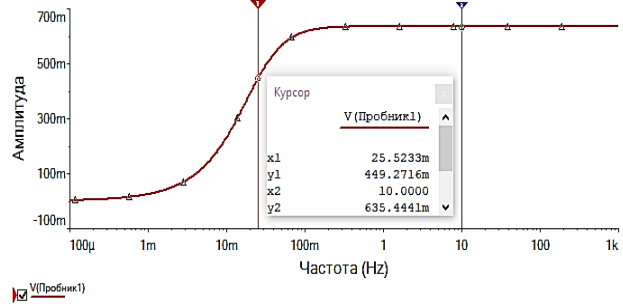


Рис. 3. АЧХ фильтра

С помощью курсоров, используемых при построении графика, мы определили, что частота среза по уровню $\frac{\sqrt{2}}{2}$ приблизительно равна

$$f_{-3 \text{ дБ.ВЧ}} \approx 0.026 \text{ Гц.}$$

Теперь мы можем произвести расчет фильтра нижних частот (рис. 4).

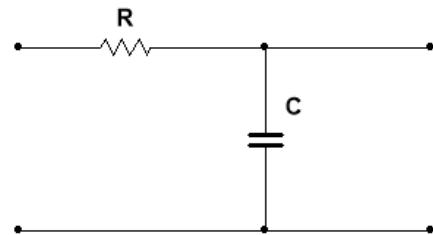


Рис. 4. Фильтр нижних частот

Частота среза для фильтра нижних частот определяется следующим образом:

$$f_{-3 \text{ дБ.НЧ}} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{\text{НЧ}} \cdot C_{\text{НЧ}}}. \quad (4)$$

В качестве емкости возьмем конденсатор с емкостью $C_{\text{НЧ}} = 0.15 \text{ мкФ}$. Так как частота среза равна

$$f_{-3 \text{ дБ.НЧ}} = 150 \text{ Гц,}$$

отыщем нужное нам сопротивление резистора $R_{\text{НЧ}}$:

$$R_{\text{НЧ}} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{\text{НЧ}} \cdot f_{-3 \text{ дБ.НЧ}}} \approx 7.073 \text{ кОм.}$$

Для проверки расчетов используем САПР Multisim, проведём построение схемы и амплитудно-частотной характеристики (рис. 5, рис. 6).

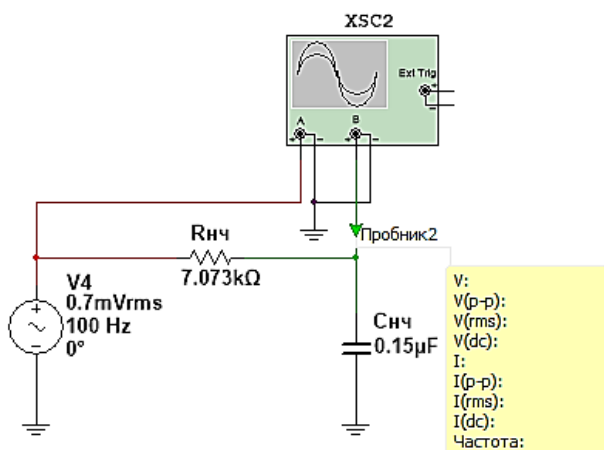


Рис. 5. Моделируемая схема

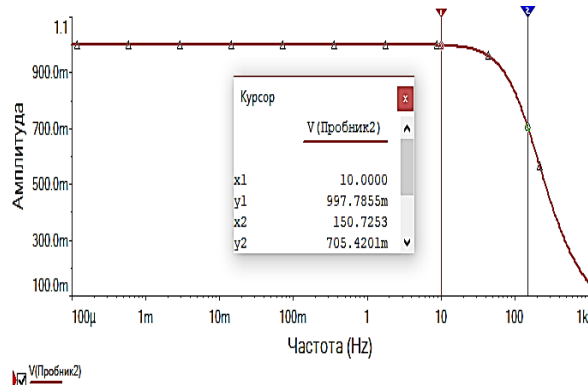


Рис. 6. АЧХ фильтра

При построении графика мы определили, что частота среза фильтра нижних частот по уровню 0.707 равна примерно 150.725 Гц.

Влияние емкостной связи на уровень принимаемого сигнала

При изменении расстояния между кожей и пластиной электрода (толщины ткани) будет меняться эквивалентная емкость $C_{\text{ЭКВ.}}$. То есть происходит изменение частоты среза $f_{-3\text{ dB}}$, которое в свою очередь неизбежно приводит к изменению амплитудно-частотной характеристики. Возьмем данные ниже характеристики электрода и рассчитаем эквивалентные емкости для каждого из вариантов:

$$d_{\text{ТКАНЬ1}} = 0.16 \text{ мм}, d_{\text{ТКАНЬ3}} = 0.6 \text{ мм}, \\ d_{\text{П.Э}} = 48 \text{ мм}, \varepsilon_{\text{ТКАНЬ}} = 1.4;$$

$$C_{\text{ЭКВ.1}} = \frac{\varepsilon_{\text{ТКАНЬ}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{П.Э}}}{2}\right)^2}{d_{\text{ТКАНЬ1}}} \approx 140.15 \text{ пФ}, (5)$$

$$C_{\text{ЭКВ.3}} = \frac{\varepsilon_{\text{ТКАНЬ}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{П.Э}}}{2}\right)^2}{d_{\text{ТКАНЬ3}}} \approx 37.37 \text{ пФ}. (6)$$

Для получения результатов рассматриваемых случаев используем известное промежуточное значение эквивалентной емкости $C_{\text{ЭКВ.2}} = C_{\text{ЭКВ.}} = 43.577 \text{ пФ}$.

Используя САПР Multisim, проведем построение схемы, включающей эквивалентную емкость, повторитель, фильтр нижних частот, и получим амплитудно-частотные характеристики трех видов (рис. 7, рис. 8).

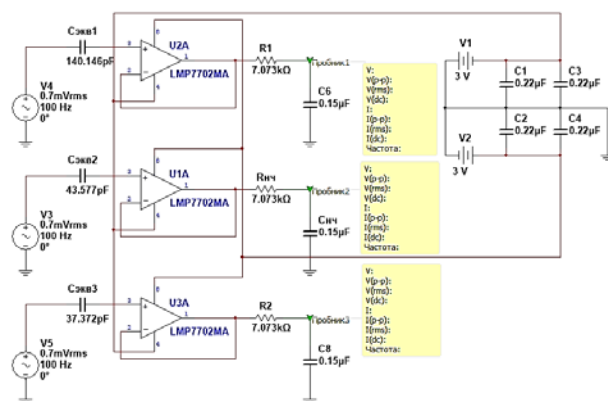


Рис. 7. Моделируемая схема

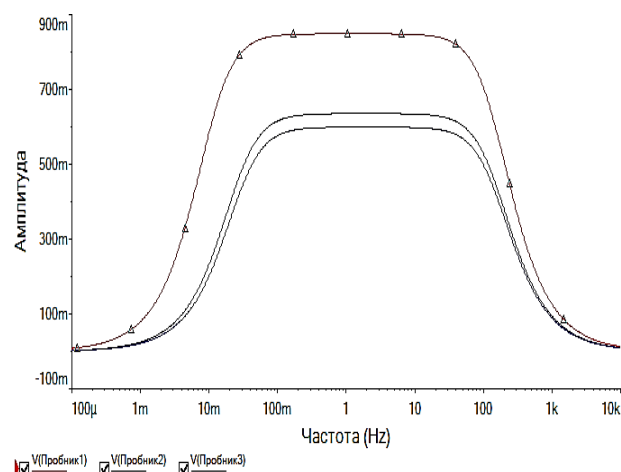


Рис. 8. АЧХ фильтров

Построим график зависимости амплитудно-частотной характеристики от толщины хлопчатобумажной ткани. Для этого воспользуемся системой компьютерной алгебры Mathcad (рис. 9) и данными АЧХ.

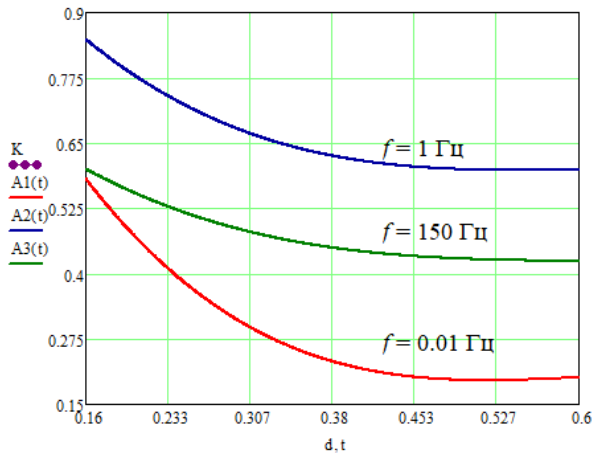


Рис. 9. Отображение результатов рассматриваемых случаев

Однако, проводя построение графиков, мы учитывали только толщину хлопчатобумажной ткани. То есть тело человека, ткань и электрод непосредственно соприкасались друг с другом. В реальности дело обстоит иначе, существует незначительная прослойка воздуха как на границе кожа-ткань, так и на границе ткань-электрод. Таким образом, возникают дополнительные диэлектрические слои в эквивалентном конденсаторе, которые необходимо учитывать. Поэтому с учетом вышесказанного проведем расчет рассматриваемого эквивалентного конденсатора.

Проверим полученные расчеты эквивалентной емкости и сравним амплитудно-частотные характеристики с учетом воздушной прослойки и без, смоделировав все в САПР Multisim (рис. 10).

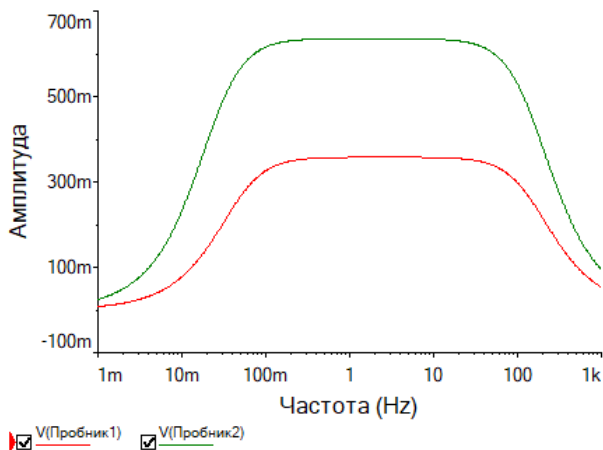


Рис. 10. Проверка полученных расчетов

Наблюдаются значительные потери как по амплитуде, так и по частоте. Всего 0.6 мм воздуха почти в 2 раза уменьшают амплитуду сигнала. Иначе говоря, нам необходимо найти

то расстояние, при котором еще возможно наблюдение наибольших по амплитуде участков электрокардиосигнала

$$U_{BX} = 0.03 \dots 10 \text{ мВ.}$$

Такую роль играет так называемый QRS-комплекс. Комплекс QRS - это желудочковый комплекс, который регистрируется во время возбуждения желудочков сердца. Это наибольшее отклонение на ЭКГ. Ширина комплекса QRS указывает на продолжительность внутрижелудочкового возбуждения и в норме составляет 0,06-0,09 (до 0,1). Ширина комплекса QRS несколько уменьшается с учащением сердечного ритма, и наоборот [2].

Исходя из длительности QRS-комплекса его частота приблизительно равна

$$f = \frac{1}{\tau_{QRS}} \approx 10 \dots 17 \text{ Гц.} \quad (7)$$

Ближайшая частота данной полосы, на которую оказывает влияние изменение эквивалентной емкости равно 10 Гц. Теперь есть возможность задать параметры генератора, имитирующего кардиосигнал, в САПР Multisim (рис. 11, рис. 12). Помимо этого, зададим максимальную толщину хлопчатобумажной ткани, чтобы ухудшить условия моделирования.

$$U_m = 10 \text{ мВ; } U_{rms} \approx 7 \text{ мВ; } f = 10 \text{ Гц; } d_{\text{ткань}} = 0.6 \text{ мм.}$$

В условии непосредственной близости кожи, ткани и электрода рассчитаем эквивалентную емкость.

$$C_{\text{ЭКВ.4}} \approx 27.599 \text{ пФ.} \quad (8)$$

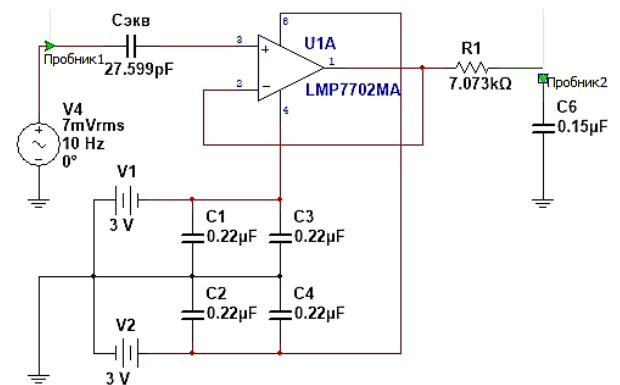


Рис. 11. Модель электрода

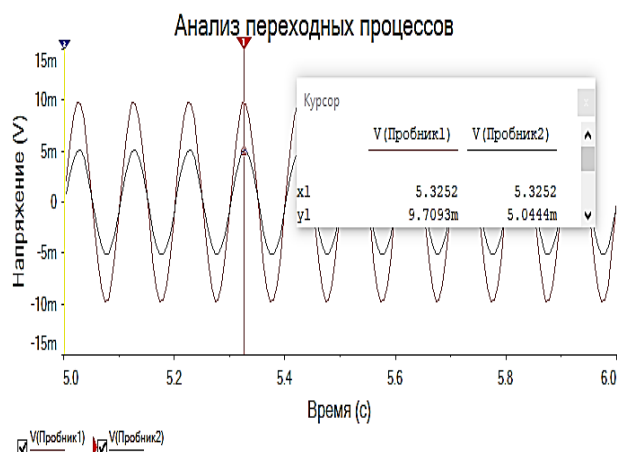


Рис. 12. Анализ переходных процессов

Отношение амплитуды выходного напряжения к входному $K_{\text{СПАД}}$ равно:

$$K_{\text{СПАД}} = \frac{U_{m.\text{ВЫХ}}}{U_{m.\text{ВХ}}} \approx 0.5195. \quad (9)$$

Предельное усиление и активная фильтрация

Для того чтобы уже электрический сигнал на выходе разрабатываемого устройства с малыми потерями переходил на последующие каскады обработки информации, мы реализуем на одной интегральной микросхеме (если рассматривать один электрод) не только буферизацию, но и так называемую активную фильтрацию. Это означает, что, помимо обеспечения частоты среза 150 Гц по уровню -3дБ, мы усиливаем полученный с буфера электрический сигнал. Возникает проблема выбора коэффициента усиления.

Ранее нами было исследовано прохождение через схему гармонического сигнала с частотой 10 Гц, который имитировал комплекс QRS, важную составляющую сердечного ритма, а также обладающей наибольшей амплитудой. Другими словами, пределом усиления будет являться напряжение элемента питания 3В. Добиваться большего усиления не имеет смысла. В таком случае R-пик останется на таком же уровне 3В, тогда как другие частоты будут увеличиваться, что приведет к затруднению обработки и выделения комплекса QRS из исследуемого частотного диапазона.

Таким образом, нам следует использовать наиболее приемлемые параметры для расчета активного фильтра. Во-первых, это непосредственно эквивалентная емкость. Для максимально полной передачи энергии от тела чело-

века к электроду, она должна быть наибольшей. Ограничения вызваны толщиной хлопчатобумажной ткани, расстоянием между кожей и электродом, конструктивными особенностями самого электрода. Тончайший хлопок имеет толщину 0.16 мм, $\epsilon_{\text{ТКАНЬ}} = 1.4$. Ввиду плотного прилегания электрода к телу через ткань и, как следствие, наличия небольшой воздушной прослойки, расстояние между первым и кожей также будет равно 0.2 мм. Диаметр электродной пластины примем равной 40 мм. Тогда эквивалентная емкость будет равной:

$$C_{\text{ЭКВ.}} = \frac{\epsilon_{\text{ТКАНЬ}} \cdot \epsilon_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{П.Э.}}}{2}\right)^2}{\frac{d_{\text{ВОЗДУХ}}}{\epsilon_{\text{ВОЗДУХ}}} + \frac{d_{\text{ТКАНЬ}}}{\epsilon_{\text{ТКАНЬ}}}} \approx 101 \text{ пФ}. \quad (10)$$

В проведенных ранее исследованиях мы не учитывали собственно кожный импеданс, представляющий собой параллельную RC цепочку со значениями сопротивления и емкости 51 кОм и 47 нФ соответственно. Такие значения практически не влияют на результаты, но их мы учтем, чтобы весь процесс происходил при условиях, приближенных к реальным [3]. На рис. 13 показано влияние эквивалентной емкости и незначительное влияние кожного импеданса на прохождение сигнала.

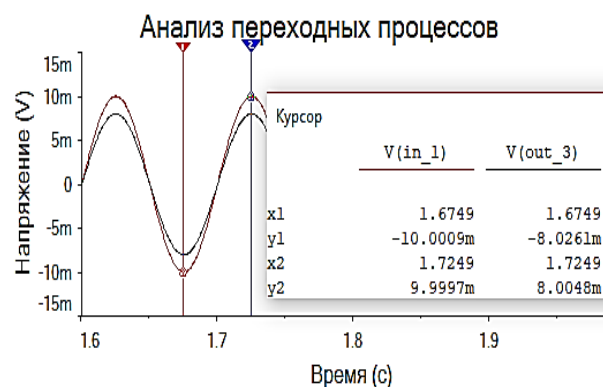


Рис. 13. Влияние эквивалентной емкости и кожного импеданса на прохождение сигнала

Структурная модель разработанной схемы датчика для регистрации биопотенциалов проиллюстрирована на рис. 14.

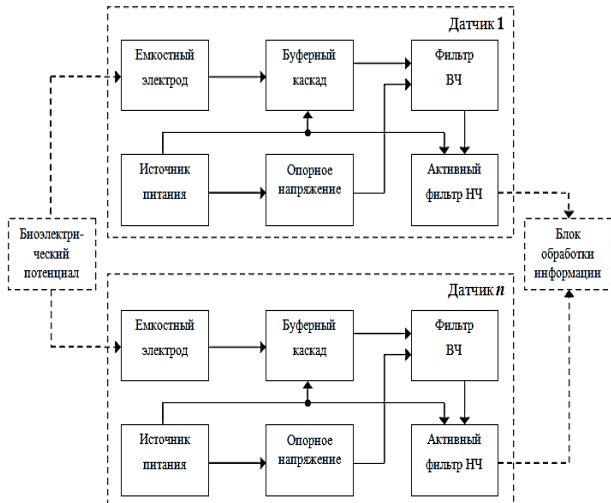


Рис. 14. Структурная модель разработанной схемы датчика для регистрации биопотенциалов

Влияние высокочастотных помех

Высокочастотные электромагнитные помехи наводятся от таких источников, как радио и телевизионные передатчики, мобильные и радиотелефоны, тиристорные преобразователи, коллекторные электродвигатели, электросварочное оборудование, дисплеи компьютеров и сами компьютеры [4]. Помехи с частотой выше 100 кГц обычно находятся за границей частотного диапазона измерительных систем, однако высокочастотные помехи могут быть нежелательным образом выпрямлены или перенесены в область более низких частот по причине нелинейности характеристик диодов и транзисторов, расположенных на измерительной плате и внутри микросхем.

В системах с очень высокой чувствительностью могут наблюдаться паразитные напряжения, вызванные термоэлектрическим эффектом в контактах разнородных металлов, трибоэлектричеством, возникающим при трении диэлектриков друг о друга, пьезоэлектрическим эффектом и эффектом электростатического или электромагнитного микрофона. Эти источники помех опасны тем, что встречаются редко, поэтому о них зачастую забывают [5]. Таким образом, для возможности подавления высокочастотных помех имеет место использовать так называемые ферритовые фильтры.

Простейшими типами фильтров, не требующих больших затрат, но существенно ослабляющих воздействие короткого (то есть аналогичного по свойствам высокочастотному сигналу) электромагнитного импульса в проводах, подключенных к электронной аппаратуре, являются различных форм ферритовые

фильтры, взаимодействующие с проводами [6].

Импеданс катушки, образованной одним или несколькими витками контрольного кабеля, пропущенного через ферритовое кольцо, очень мал для низкочастотных рабочих сигналов и для переменного тока промышленной частоты и очень велик для высокочастотных (импульсных) сигналов в определенном диапазоне частот, зависящем от количества витков, материала и геометрических размеров кольца. В результате импульсные и высокочастотные помехи, попавшие в такой кабель, будут существенно ослаблены. Затухание, вносимое такими фильтрами, составляет 10–15 дБ.

В электронной аппаратуре такие фильтры можно использовать повсеместно: и в цепях питания, и в цепях передачи логических и импульсных сигналов, и в цепях связи (рис. 15) [6].

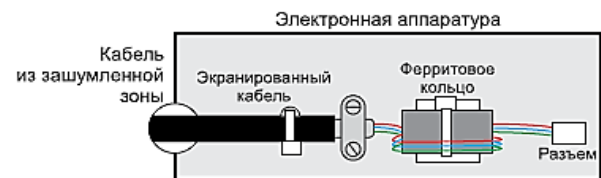


Рис. 15. Ферритовый фильтр

При различных частотах требуется и различный материал феррита. Для 100 МГц желателен NiZn (никель/цинк). Начальная магнитная проницаемость такого материала равна 850. На частоте 100 МГц (рис. 16) добротность рассматриваемой катушки принимает значение 0.138.

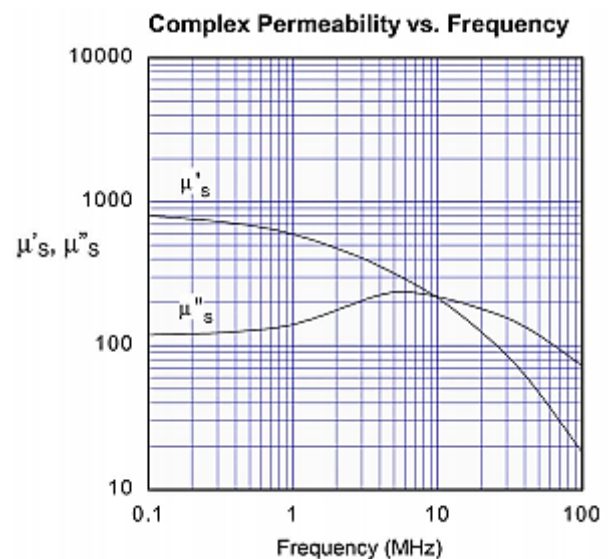


Рис. 16. Зависимость магнитной проницаемости от частоты

Ферриты в электронной аппаратуре, предназначенные для монтажа, называют еще ферритовыми бусинами. Простейшей формой ферритовой бусины является проводящий провод, вставленный через полый кусок феррита. Используется последовательно с линией питания, это означает, что любой постоянный ток, протекающий через бусину, создаст падение напряжения, пропорциональное сопротивлению по постоянному току. Эквивалентная схема первого порядка изображена на рис. 17.

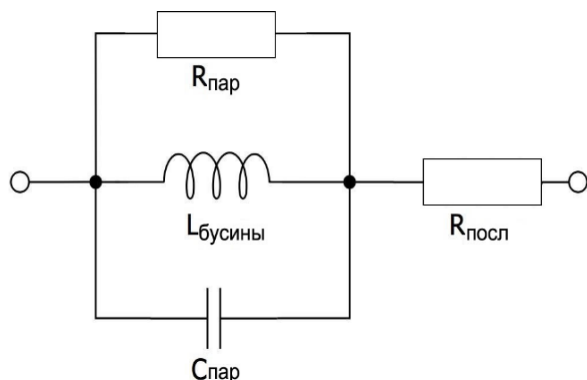


Рис. 17. Ферритовая бусина

Во многих ферритовых бусинах поверхностного монтажа проводник оформляется в виде катушки, причем отдельные витки накладываются между ферритовыми листами. Таким образом, электрические характеристики также зависят от деталей конструкции намотки.

Заключение

Была рассмотрена разработка системы для бесконтактной регистрации медико-биологических показателей. Модель включает непосредственно электрод, обеспечивающий бесконтактное считывание биопотенциалов человека через емкостную связь; буферный каскад, необходимый для согласования приемной части устройства с последующими каскадами; высокочастотный фильтр с требуемой частотой среза; делитель напряжения в каче-

стве смесителя постоянного напряжения на необходимое значение; активный фильтр, служащий для конечного усиления и низкочастотной фильтрации электрического сигнала.

В процессе разработки произведен расчет площади электрода, которая равна 12.568 см^2 , эквивалентной емкости, связующей электрод и кожу человека, составляющей 100.945 пФ , высокочастотного RC-фильтра с частотой среза по уровню -3дБ 0.987 Гц , который исключает постоянную составляющую, созданную буферным каскадом, резистивного делителя напряжения $360/1 \text{ кОм}$, осуществляющего подъем постоянной составляющей сигнала на 8.315 мВ для его прохождения с полной амплитудой, активного низкочастотного фильтра с коэффициентом усиления 180.65 и частотой среза по уровню -3 дБ 158.3 Гц .

В основе буферного каскада и активного фильтра лежит высокоточная интегральная микросхема с КМОП-структурой LMP7702, которая совмещает оба каскада. Она обладает высоким входным импедансом, низким электропотреблением и низким уровнем собственных шумов, а также способностью работать с однополярным питанием и работать в режиме диапазона напряжений от питания до питания по входу и по выходу.

Литература

1. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp7702.pdf>
2. Wearable medical systems for p-health / X.-F. Teng, Y.-T. Zhang, C. Poon, and P. Bonato // IEEE Rev. Biomed. Eng. 2008. Vol. 1. No. 1. Pp. 62–74.
3. Peng G., Sterling M., and Bocko M. Non-contact, capacitive biosensor electrodes for electrostatic charge reduction // In: 2013 IEEE Sensors, 2013. Pp. 1–4.
4. Taheri B.A., Knight R.T., and Smith R.L. A dry electrode for EEG recording // Electroencephalography Clin. Neurophysiol. 1994. Vol. 90. No. 5. Pp. 376–383.
5. A performance comparison of dry-foam type capacitively coupled EEG electrodes depending on the contact area / J.H. Kim, H.J. Baek, Y.G. Lim, and K.S. Park // In: 46th Conference of Korean Society of Medical & Biological Engineering. Korea, 2012. Pp. 517–518.
6. Ott H.W. Noise reduction techniques in electronic systems. New York: Wiley, 1988.

Поступила 14.05.2019; принята к публикации 29.07.2019

Информация об авторах

Журавлев Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ddom@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-9704>

Сафонов Иван Александрович – д-р техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: saff@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-4770>

Остроумов Иван Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

Анисимов Иван Сергеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pilot7mig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0681-1299>

DEVELOPMENT OF CONTACTLESS ECG SIGNALS READING SYSTEM

D.V. Zhuravlev, I.A. Safonov, I.V. Ostroumov, I.S. Anisimov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in this article, we consider the features of the development of a system designed for non-contact reading of biomedical indicators (ECG signals), by calculating and modeling the electrical circuit that allows the non-contact sensor system to register the bioelectric potentials of the human body. The electrical circuit provides maximum gain in the most favorable conditions. If you rely on the worst performance, the amplitude of the QRS-complex will reach the gain limit with the appearance of the best conditions for the removal of biopotentials. Capacitive electrodes will allow one to reach a completely new level of convenience and comfort of using biomedical measuring devices in everyday life, and will significantly reduce costs due to the very long term use of such electrodes. The active filter, among other things, also helps to get rid of common-mode noise induced by the power supply network. The model includes: a direct electrode that provides contactless sensing of the biopotentials of the person through capacitive coupling; buffer stage, necessary for matching the receiving part of the device with the subsequent stages; high-frequency filter with the required cutoff frequency; voltage divider as a DC voltage mixer to the required value; active filter, serving for the final gain and low-frequency filtering of the electric signal

Key words: system of non-contact reading of biomedical parameters, ECG, active filter, capacitive electrode

References

1. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp7702.pdf>
2. Teng X.-F., Zhang Y.-T., Poon C., Bonato P., "Wearable medical systems for p-health," *IEEE Rev. Biomed. Eng.*, Jan. 2008, vol. 1, no. 1, pp. 62–74.
3. Peng G., Sterling M., Bocko M. "Non-contact, capacitive biosensor electrodes for electrostatic charge reduction", *IEEE Sensors*, 2013, pp. 1-4.
4. Taheri B.A., Knight R.T., Smith R.L. "A dry electrode for EEG recording," *Electroencephalography Clin. Neurophysiol.*, 1994, vol. 90, no. 5, pp. 376–383.
5. Kim J.H., Baek H.J., Lim Y.G., Park K.S. "A performance comparison of dry-foam type capacitively coupled EEG electrodes depending on the contact area", *46th Conference of Korean Society of Medical & Biological Engineering*, Korea, 2012, pp. 517–518.
6. Ott H.W. "Noise reduction techniques in electronic systems", New York, Wiley, 1988.

Submitted 14.05.2019; revised 29.07.2019

Information about the authors

Dmitriy V. Zhuravlev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ddom@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-9704>

Ivan A. Safonov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: saff@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-4770>

Ivan V. Ostroumov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

Ivan S. Anisimov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pilot7mig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0681-1299>

**ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ TSV-ОТВЕРСТИЙ И RDL-СЛОЁВ
НА ТЕПЛОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В 3D-DRAM****Д.А. Хараджиди^{1,2}, К.Н. Багнюков², Н.В. Ципина¹, А.В. Муратов¹**¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**²**АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассматриваются особенности конструкций 3D-DRAM (dynamic random access memory – англ., динамическая память с произвольным доступом) сборок интегральных схем (ИС) с различным расположением TSV-отверстий (through-silicon via - англ., связи сквозь кремний), бампов (bump - англ., припойный шарик), наличием/отсутствием RDL (redistribution layer - англ., перенаправляющий слой) на кристаллах стека и логики. Исследуется зависимость влияния положения составных элементов на тепловыделение каждого отдельно взятого элемента сборки и всей системы в целом. Для проведения термического исследования промоделировано 4 варианта конструкции трёхмерных интегральных схем в зависимости от расположения сквозных кремниевых отверстий и перенаправляемого слоя на памяти и логике: ребро + нецентр, центр + центр, ребро + центр + RDL и центр+RDL + центр + RDL. Каждому ключевому элементу сборки присвоены свойства их реальных прототипов такие, как плотность, температура плавления, теплопроводность, коэффициент теплового расширения, удельная теплота плавления. Термическое исследование проведено при помощи современных систем автоматического проектирования. Определён наиболее оптимальный по тепловыделению и по стоимости всей системы вариант сборки

Ключевые слова: TSV, 3D-сборка, RDL, моделирование, проектирование, теплоанализ

Введение

На сегодняшний день одним из способов обеспечения более высокого уровня функциональности ИС при минимальных размерах и максимальной скорости является путь развития разработки 3D-сборок. Увеличение плотности трехмерных интегральных микросхем, которое становится возможным благодаря вертикальному размещению элементов, будет способствовать многократному снижению себестоимости схем в сравнении с традиционными двухмерными микросхемами, при том же технологическом процессе производства. Наиболее перспективной на данный момент является технология TSV, позволившая полностью удалить операцию разварки проволоочных выводов из технологического маршрута, что обеспечивает максимально допустимый уровень интеграции микросхем.

В тех случаях, когда нецелесообразно делать заказ изготовителю микросхем на производство ИС в соответствии с техническими требованиями заказчика или выгодно использовать накопленные запасы, возникает необходимость изменить расположение контактных площадок. Чтобы перенаправить схему ввода/вывода в новую, более свободную зону, необходимо прибегнуть к добавлению металлических и диэлектрических слоев на поверхность пластины - перенаправляющего слоя RDL (рис. 1). Такое перераспределение требует использования тонкопленочных полиме-

ров (BCB, PI) и металлизации (Al или Cu) для перенаправления периферийных (вторичных) площадок в конфигурацию массива [1].

Дорожка перераспределения может быть изготовлена непосредственно при первичной пассивации (SiN или SiON) или проложена поверх второго слоя полимера.

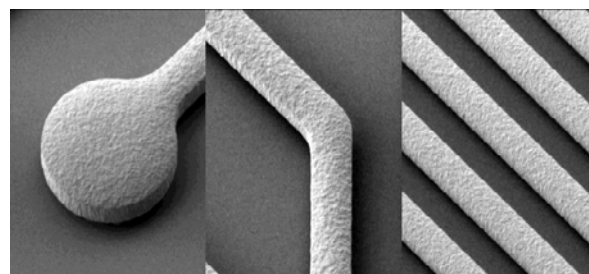


Рис. 1. Внешний вид RDL

В прошлом было широко распространено мнение, что RDL является временной мерой и использование данной технологии прекратится, поскольку конструкции микросхем сильно уменьшатся, в соответствии с законом Мура, и контактные площадки будут находиться в одном массиве. Однако на сегодняшний день, технология RDL нашла применение в 3D-сборках.

Цель исследования

Целью данной работы является проведение термического исследования для изучения влияния теплораспределения от расположения.

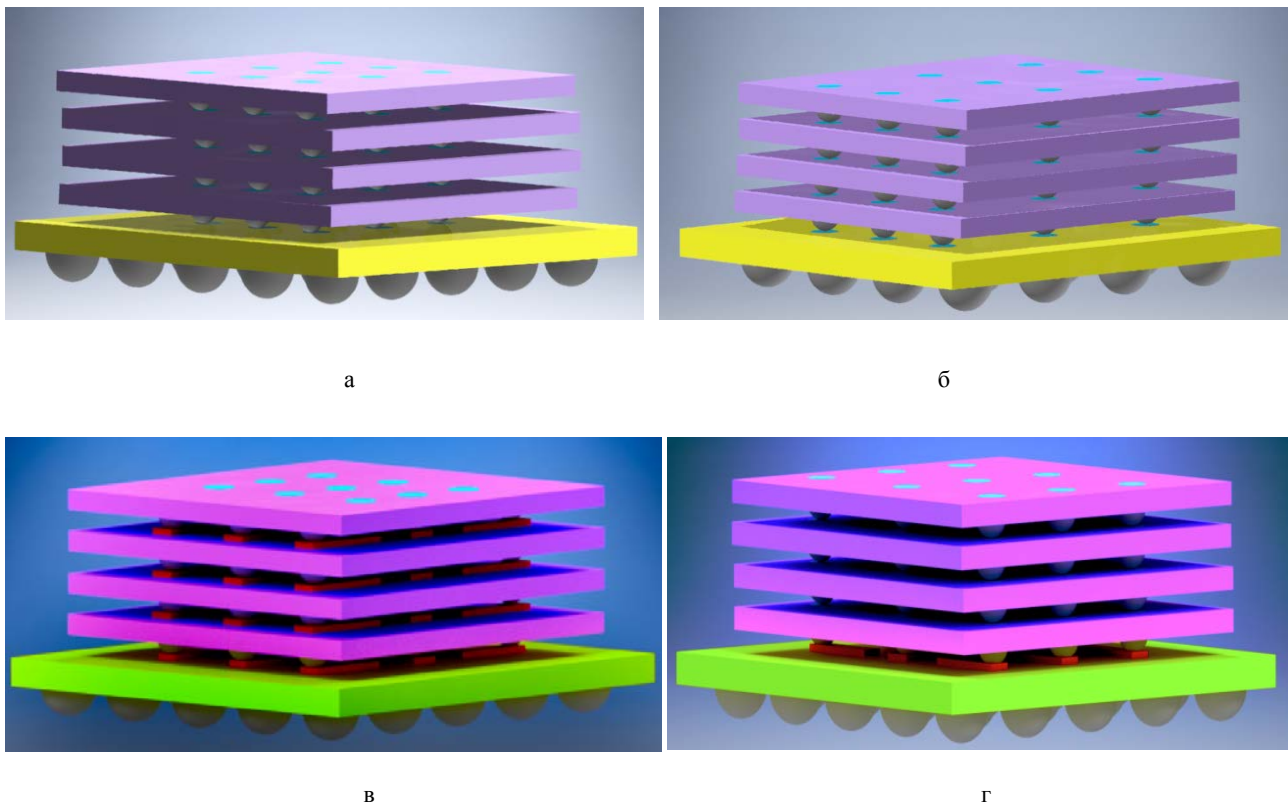


Рис. 2. 3D-DRAM с различным расположением TSV и RDL (память + логика): а – центр + центр, б – ребро + нецентр, в – центр + центр + RDL, г – ребро + центр + RDL

TSV-отверстий и RDL. Объект исследования - 3D-DRAM с различными конструктивными особенностями расположения TSV-отверстий и RDL-слоев. На рис. 2 показаны четыре варианта сборки 3D-DRAM, в табл. 1 приведено сравнение их примерной стоимости в зависимости от конструкции кристаллов.

Таблица 1
Сравнения характеристик взаиморасположения TSV и RDL

Вид проектировки TSV	Центр + центр	Ребро + нецентр	Центр + центр + RDL	Ребро + центр + RDL
Стоимость кристалла памяти	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя
Стоимость кристалла логики	Низкая	Высокая	Средняя	Высокая
Итоговая стоимость	Минимальная	Максимальная	Средняя	Высокая

Как видно из данных табл. 1, расположение TSV-отверстий по центру без RDL-слоя имеет самую низкую стоимость. Замена пограничных TSV на RDL снижает стоимость, одна-

ко вносит более высокий шум мощности [2] из-за дополнительного сопротивления RDL. Известно, что тепло, рассеиваемое в ядрах кристаллов стека, повышает температуру внутри сборки в целом. Следовательно, блоки подсистем, расположенные ближе к более нагретым точкам, также нагреваются сильнее подсистем, которые физически расположены дальше. Изменения температуры модулируют параметры устройства, тем самым изменяя его характеристики, это называется тепловой перекрестной помехой. Процесс создания стеков логических ядер и памяти стал ключевым моментом 3D-интеграции. Однако колебания температуры, следственно шума, в 3D-сборках ухудшают производительность и надежность динамической оперативной памяти [3]. Обильное тепловыделение способно привести к параметрическим сбоям, вследствие изменения рабочего состояния, то есть сбою процесса чтения и записи, а также к падению напряжения [4]. Дополнительные параметрические изменения приводят к сбоям в узлах нанометровой технологии. Поэтому было решено провести моделирование тепловых процессов при нормальных условиях работы 3D-DRAM.

Таблица 2

Свойства материалов

Материал	Кремний	Свинец	Медь	Золото
Плотность, г/см ³	2,33	11,35	8,92	19,3
Температура плавления, К	1688	600,61	1356,55	1337,33
Теплопроводность, Вт/м·К	149	35,3	401	300
Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁶ · °С	5,1	28,0	16,6	14,2
Удельная теплота плавления, кДж/моль	50,6	4,77	13,01	12,68

Для проведения теплоанализа необходимо задать свойства материалов в САПР (система автоматизированного проектирования). Рассматриваемая 3D-сборка состоит из кремниевых кристаллов (Si), припойных шариков (бампов) из свинца (Pb), медных TSV (Cu), золотых RDL (Au). Все данные, необходимые для проведения температурного анализа, записаны в табл. 3. Исследуется зависимость нагрева системы в целом, а также отдельных взятых элементов в её составе от расположения RDL и TSV. При тепловом анализе рассматриваемые приборы находились под воздействием температуры 300K, на кристалл воздействовала мощность равная 10Вт, на логику 15Вт [5]. На рис. 3 представлены результаты термического исследования 3D-DRAM для расположения TSV-отверстий относительно контактов подложки по типу «центр + центр».

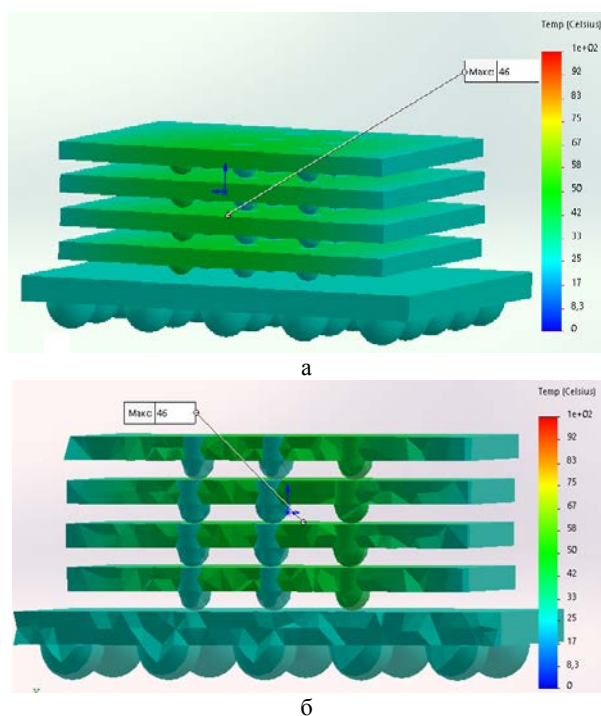


Рис. 3. Термический анализ 3D-сборки с расположением TSV по центру: а – общий вид, б – разрез

В данном случае максимальная температура при нормальных режимах работы (как обра-

зец был взят процессор Intel core i7) равна 46 °С, при этом температура бампов равна 27 °С, TSV – 29 °С. Учитывая, что критическая температура работы процессора ~ 100 °С [6], делается вывод, что модели не требуется дополнительное охлаждение. Следующий анализ проведен на сборке с расположением TSV-отверстий по типу «ребро+нецентр», при аналогичных условиях. Результаты представлены на рис. 4.

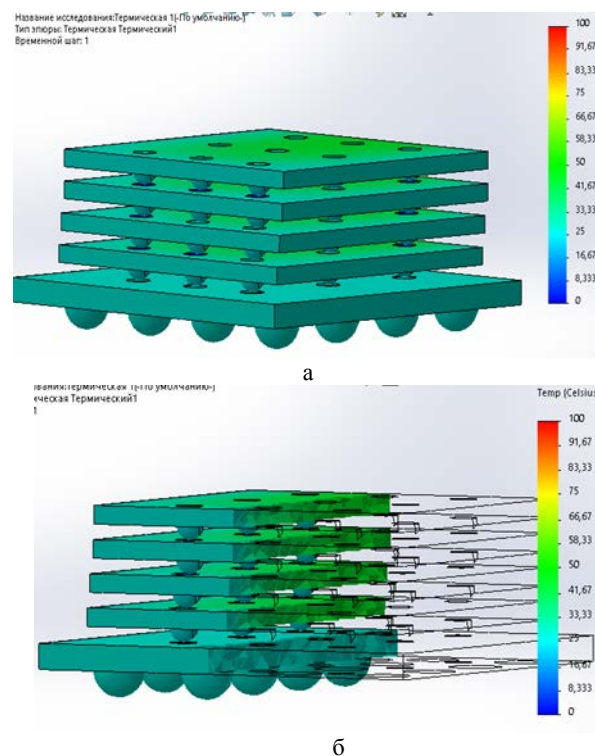


Рис. 4. Термический анализ 3D-сборки с пограничным расположением TSV: а – общий вид, б – разрез

В данном случае сборки при нормальных режимах работы максимальная температура равна 46,5 °С, температура бампов равна 24,9 °С, TSV – 26,9 °С. В сравнении с предыдущим типом конструкции выявлено, что общая температура увеличилась незначительно, но на отдельных элементах уменьшилась на пару градусов: на бампах охлаждение составило примерно 2°С, на TSV ~ 3°С. Учитывая, что максимально допустимая температура работы всей системы не

должна превышать 100°C, делается вывод, что внешнее охлаждение не требуется.

Следующий анализ проведен на сборке с пограничным расположением TSV на четырех стеках + центр на нижней подложке + RDL, при аналогичных условиях результаты представлены на рис. 5.

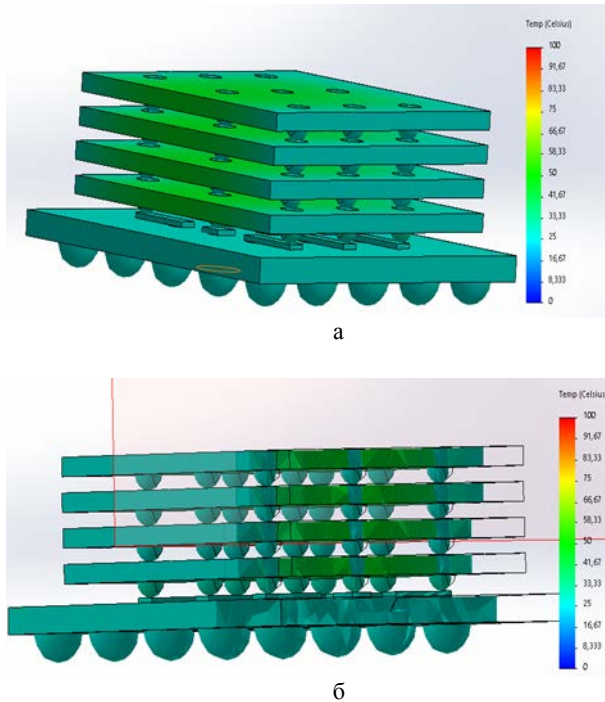


Рис. 5. Термический анализ 3D-сборки с пограничным расположением TSV на четырех стеках + центр на нижней подложке + RDL: а – общий вид, б – разрез

В целом температура системы понизилась на один градус, по сравнению с предыдущими результатами. На бампах, взаимодействующих с перенаправляющим слоем, - повысилась на 5°C и 3°C, но в целом как бампы, так и TSV имеют незначительные температурные сдвиги (температура TSV совпадает с температурой в системе с пограничным расположением, но меньшим на 2°C чем с центральным, у бампов стека аналогичная ситуация). Следовательно, добавление RDL на один лишь кристалл позволяет добиться охлаждения всей системы на несколько градусов, при неизменной температуре на схожих элементах конструкций.

В данном случае сборки при нормальных режимах работы максимальная температура равна 45,1°C, температура бампов, расположенных на стеках равна 26,9°C, бампов, расположенных непосредственно на RDL слоях – 29,9 °C, TSV – 26,8°C, RDL слой нагрелся до 27,4°C. В целом температура системы понизи-

лась на один градус, в сравнении с предыдущими результатами.

Следующее термическое исследование проводится на сборке с центральным расположением TSV и наличием RDL на каждом стеке рис. 6.

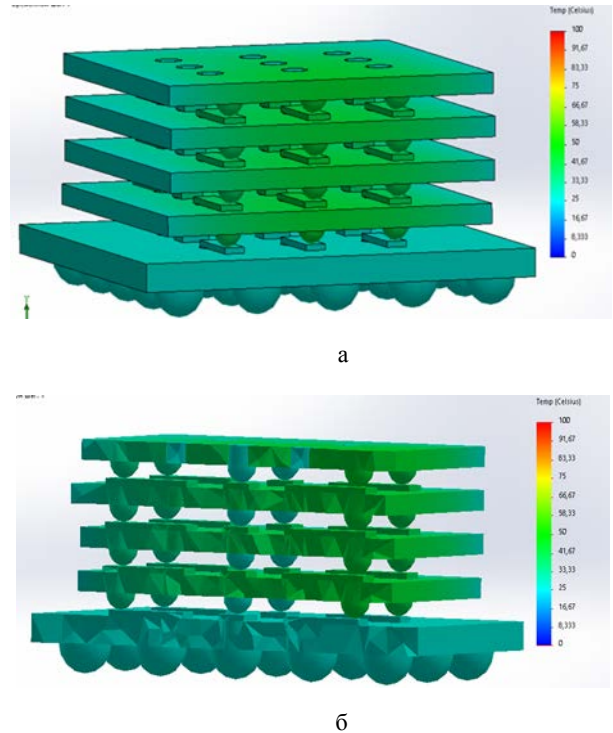


Рис. 6. Термический анализ 3D-сборки с центральным расположением TSV и наличием RDL на каждом стеке: а – общий вид, б – разрез

В данном случае максимальная температура сборки достигла 44 °C, самый нагретый элемент – RDL (стек) 42,9 °C, в то время как нагрев RDL на подложке достиг 27,5 °C, температура TSV равна 40,7 °C, бампы – 39,06 °C.

По итогам термических исследований получаем, что использование RDL-слоя в составе 3D-DRAM приводит к снижению температуры всей системы на 2-3 °C, но в то же время температура составных элементов увеличивается примерно на 10 °C.

Данный эффект может быть вызван из-за выбора золота в качестве материала для перенаправляющего слоя [7]. На основе результатов термических исследований типов сборки и их конечной стоимостью, была составлена табл. 3.

Как видно из табл. 1 и 3 вариант сборки «Ребро+Центр RDL» является наиболее оптимальным с точки зрения стоимости.

Таблица 3

Сравнение термического исследования 3D-сборок с их конечной стоимостью

Тип сборки	Температура при нормальных режимах работы, °C				Итоговая стоимость
	Максимальная общая	Bump	TSV	RDL	
Центр + Центр	46	27	29	-	Минимальная
Ребро+Нецентр	47	25	27	-	Максимальная
Ребро+Центр RDL	45	25	27	27	Высокая
Центр RDL+ Центр RDL	44	39	41	43	Высокая

Заключение

Были построены модели различных типов 3D TSV. Для дальнейшего термического исследования каждому элементу модели был присвоен свой материал, выявлены зависимости нагрева всей системы от расположения элементов в ней. По результатам теплоанализа выяснено, что конструкция типа «центр RDL+ центр RDL» имеет самый низкий показатель нагрева (44 °C), при средней стоимости конечного изделия, что на фоне других исследуемых конструкций делает её самой оптимальной. В результате исследований было отмечено понижение рабочих температур, при использовании золотого перенаправляющего слоя, что послужило поводом для проведения температурного анализа выявления зависимости показателя температур от выбранного материала.

Литература

1. Samal S.K. Full chip impact study of power delivery network designs in monolithic 3D ICs // IEEE Int. Conf. on

Computer-Aided Design. Nov 2014. Pp. 565–572.

2. Zhao X., Scheuermann M., and Lim S.K. Analysis and Modeling of DC Current Crowding for TSV-Based 3-D Connections and Power Integrity // Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2014. Vol. 4. № 1. Pp. 123–133.

3. Cho J. Modeling and Analysis of Through-Silicon Via (TSV) Noise Coupling and Suppression Using a Guard Ring // IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. 2011. Pp. 220–233.

4. Araga Y. Measurements and Analysis of Substrate Noise Coupling in TSVBased 3-D Integrated Circuits // IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. 2014. Vol. 4. № 6. Pp. 1026–1037.

5. Kim D.H., Mukhopadhyay S., and Lim S.K. Fast and Accurate Analytical Modeling of Through-Silicon-Via Capacitive Coupling. // IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. 2011. Vol. 1. № 2. Pp. 168–180.

6. Liu C. Full-chip TSV-to-TSV coupling analysis and optimization in 3D IC // in Design Automation Conference, 48th ACM/EDAC/IEEE, 2011. Pp. 783–788.

7. Park A.-Y. Thermo-mechanical simulations of a copper-to-copper direct bonded 3D TSV chip package interaction test vehicle // in IEEE Electronic Components and Technology Conf. 2013. Pp. 2228–223.

Поступила 07.06.2019; принята к публикации 29.07.2019

Информация об авторах

Хараджиди Дмитрий Аркадьевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), инженер-электроник, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: dema1007@rambler.ru

Багнюков Кирилл Николаевич – канд. техн. наук, инженер-технолог I категории, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: kirillbagnyukov@gmail.com

Ципина Наталья Викторовна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tcnv@mail.ru

Муратов Александр Васильевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kpr@vorstu.ru

EFFECT OF LOCATION TSV AND RDL ON THERMAL DISTRIBUTION IN 3D-DRAM

D.A. Kharajidi^{1,2}, K.N. Bagnyukov², N.V. Tsipina¹, A.V. Muratov¹

¹ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

² JSC "Research Institute of Electronic Technology", Voronezh, Russia

Abstract: the article reviews 3D design features - DRAM (dynamic random-access memory) of integrated circuits (IC) assemblies, with different arrangement of TSV (through silicon through), protrusion (bump - solder ball), the presence/absence of RDL (redistribution layer) on the crystals of the stack and logic. The dependence of the influence of the position of key elements on the heat release of each individual assembly element and the entire system as a whole is investigated. For thermal studies, 4 versions of the 3D-IC design were proposed, depending on the location of TSV and RDL for memory and logic: edge + non-center, center + center, edge + center + RDL and center + RDL + center + RDL. Each key element of the assembly is assigned the properties of their real prototypes, such as density, melting point, thermal conductivity, thermal expansion coefficient, and specific heat of fusion. Thermal research carried out with the help of modern automated design systems. The work determined the most optimal variant of the cost and heat dissipation of assembly

Key words: TSV, 3D-assembly, RDL, modeling, design, thermal analysis

References

1. Samal S.K. "Full chip impact study of power delivery network designs in monolithic 3D ICs", *IEEE Int. Conf. on Computer-Aided Design*, Nov 2014, pp. 565–572.
2. Zhao X., Scheuermann M., Lim S.K. "Analysis and modeling of DC current crowding for TSV-based 3-D connections and power integrity", *Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Jan 2014, vol. 4, no. 1, pp. 123–133.
3. Cho J. "Modeling and analysis of through-silicon via (TSV) noise coupling and suppression using a guard ring", *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 2011, pp. 220–233.
4. Araga Y. "Measurements and analysis of substrate noise coupling in TSV-based 3-D integrated circuits", *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, June 2014, vol. 4, no. 6, pp. 1026–1037.
5. Kim D.H., Mukhopadhyay S., Lim S.K. "Fast and accurate analytical modeling of through-silicon-via capacitive coupling", *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Feb 2011, vol. 1, no. 2, pp. 168–180.
6. Liu C. "Full-chip TSV-to-TSV coupling analysis and optimization in 3D IC", *Design Automation Conference, 2011 48th ACM/EDAC/IEEE*, 2011, pp. 783–788.
7. Park A.-Y. "Thermo-mechanical simulations of a copper-to-copper direct bonded 3D TSV chip package interaction test vehicle", *IEEE Electronic Components and Technology Conf.*, May 2013, pp. 2228–2234.

Submitted 07.06.2019; revised 29.07.2019

Information about the authors

Dmitriy A. Kharajidi, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), Engineer, JSC "Research Institute of Electronic Technology" (5, Saryh Bolshevikov, Voronezh, 394033, Russia) e-mail: de-ma1007@rambler.ru

Kirill N. Bagnukov, Cand. Sc. (Technical), Engineer of the I category, JSC "Research Institute of Electronic Technology" (5, Saryh Bolshevikov, Voronezh, 394033, Russia) e-mail: kirillbagnukov@gmail.com

Nataliya V. Tsipina, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia) e-mail:tcnv@mail.ru

Aleksandr V. Muratov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia) e-mail: kibr@vorstu.ru

ЭВОЛЮЦИЯ ВОСПРИНИМАЕМОЙ ЧАСТОТЫ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

И.П. Попов

Курганский государственный университет, г. Курган, Россия

Аннотация: установлено, что частота электромагнитной волны, воспринимаемая приемником, не всегда совпадает с частотой излучения. Наиболее распространенным примером тому является эффект Доплера, который, вместе с тем, не является единственно возможной причиной такого несовпадения. При суперпозиции волн воспринимаемая частота равна промежуточному значению их частот, например, сочетание синего и желтого цвета воспринимается как зеленый. Электромагнитная волна, излучаемая уединенным точечным источником, является сферической. Это амплитудно-модулированная волна. В этой связи она не является монохроматической. Воспринимаемая частота электромагнитной сферической волны меньше частоты излучения. Чем выше излучаемая частота ω_0 и расстояние между источником и приемником, тем больше разница между излучаемой и воспринимаемой частотами. Три формулы для частоты сферической электромагнитной волны получены на основе различных математических моделей. В этой связи ключевую роль может сыграть эксперимент. При этом каждая формула может иметь лучшее соответствие в определенной пространственной зоне. Воспринимаемая частота сферической электромагнитной волны в любом случае меньше исходной частоты излучения и уменьшается по мере удаления от источника, что обусловливается математическими особенностями спектра сферической электромагнитной волны

Ключевые слова: источник, приемник, излучение, волна, частота, спектр

Введение. Воспринимаемая частота

Частота волны, воспринимаемая приемником, не всегда совпадает с частотой излучения. Наиболее распространенным примером тому является эффект Доплера, который, вместе с тем, не является единственно возможной причиной такого несовпадения [1].

Пусть имеются две волны

$$w_1 = E_0 e^{i(\omega_1 t - k_1 r)} \text{ и } w_2 = E_0 e^{i(\omega_2 t - k_2 r)}$$

[2, 3] (для целей настоящего рассмотрения начальная фаза не имеет значения). Их суперпозиция равна

$$\begin{aligned} w_1 + w_2 &= E_0 e^{i(\omega_1 t - k_1 r)} + E_0 e^{i(\omega_2 t - k_2 r)} = \\ &= E_0 \left[\cos(\omega_1 t - k_1 r) + i \sin(\omega_1 t - k_1 r) + \right. \\ &\quad \left. + \cos(\omega_2 t - k_2 r) + i \sin(\omega_2 t - k_2 r) \right] = \\ &= E_0 \left\{ \left[\cos(\omega_1 t - k_1 r) + \cos(\omega_2 t - k_2 r) \right] + \right. \\ &\quad \left. + i \left[\sin(\omega_1 t - k_1 r) + \sin(\omega_2 t - k_2 r) \right] \right\} = \\ &= E_0 \left[2 \cos \frac{(\omega_1 t - k_1 r) + (\omega_2 t - k_2 r)}{2} \times \right. \\ &\quad \times \cos \frac{(\omega_1 t - k_1 r) - (\omega_2 t - k_2 r)}{2} + \\ &\quad \left. + i 2 \sin \frac{(\omega_1 t - k_1 r) + (\omega_2 t - k_2 r)}{2} \times \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \cos \frac{(\omega_1 t - k_1 r) - (\omega_2 t - k_2 r)}{2} \Big] = \\ &= 2 E_0 \cos \frac{(\omega_1 - \omega_2) t - (k_1 - k_2) r}{2} \times \\ &\quad \times \left[\cos \frac{(\omega_1 + \omega_2) t - (k_1 + k_2) r}{2} + \right. \\ &\quad \left. + i \sin \frac{(\omega_1 + \omega_2) t - (k_1 + k_2) r}{2} \right] = \\ &= 2 E_0 \cos \frac{(\omega_1 - \omega_2) t - (k_1 - k_2) r}{2} e^{i \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} r \right)} = \\ &= E_0 k(\omega, t) e^{i \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} r \right)}. \end{aligned}$$

Из этого следует, что при суперпозиции волн *воспринимаемая частота* равна промежуточному значению их частот, например, сочетание синего и желтого цвета воспринимается как зеленый.

Целью работы является установление соответствия между частотой сферической электромагнитной волны, воспринимаемой приемником, и исходной частотой излучения.

Актуальность, научная значимость. По отклонению частоты можно оценивать расстояние между источником и приемником, что может найти применение в дальней космической навигации.

Методология работы основана на построении математических моделей с использовани-

ем спектрального анализа и принципа суперпозиции.

Результаты. Спектр сферической волны

Электромагнитная волна, излучаемая уединенным точечным источником, является сферической

$$w = \frac{E_0}{r} \sin(\omega_0 t - kr) = \frac{E_0}{ct} \sin(\omega_0 t - kr),$$

где E_0 – амплитуда напряженности электрической составляющей поля на единичном расстоянии от центра волны. Это амплитудно-модулированная волна [4]. В этой связи она не является монохроматической [5–7]. Для функции

$$f(t) = \frac{\sin \omega_0 t}{t}$$

косинус-преобразование Фурье имеет вид

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{\pi}{2}}, & 0 < \omega < \omega_0, \\ 0, & \omega > \omega_0, \end{cases}$$

поэтому функция представима в виде

$$\frac{\sin \omega_0 t}{t} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\omega_0} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cos \omega t d\omega = \int_0^{\omega_0} \cos \omega t d\omega \quad (1)$$

Здесь частоты всех составляющих гармоник меньше ω_0 . Из этого следует, что воспринимаемая частота определяется неравенством $0 < \omega < \omega_0$. Другими словами, воспринимаемая частота сферической волны меньше частоты излучения. Очевидно, что *чем выше излучаемая частота ω_0 и расстояние между источником и приемником, тем больше разница между излучаемой и воспринимаемой частотами.*

Последнее обстоятельство можно записать в виде:

$$\Delta\omega = -C^* \omega_0 r = -C^* \omega_0 ct, \quad (2)$$

где C^* – некий коэффициент. Знак «–» указывает на уменьшение частоты.

Первая формула воспринимаемой частоты сферической волны

В соответствии с принципом Гюйгенса, согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, служит источником вторичных волн, выражение (2) можно записать в дифференциальной форме

$$d\omega = -C\omega dt.$$

Из этого следует

$$\frac{d\omega}{\omega} = -C dt, \quad \int_{\omega_0}^{\omega} \frac{d\omega}{\omega} = -\int_{\tau}^t C dt, \quad \ln \omega \Big|_{\omega_0}^{\omega} = -Ct \Big|_{\tau}^t,$$

$$\ln \omega - \ln \omega_0 = C(\tau - t), \quad \ln \frac{\omega}{\omega_0} = C(\tau - t),$$

$$\omega = \omega_0 e^{C(\tau - t)}. \quad (3)$$

Здесь $\tau = R/c$, R – радиус излучающей поверхности, которая принимается сферической, c – скорость волны. Необходимость введения ненулевого τ станет очевидной при дальнейшем рассмотрении.

$$t = \tau \Rightarrow \omega = \omega_0, \quad t \rightarrow \infty \Rightarrow \omega \rightarrow 0.$$

Выражение (3) – первая формула воспринимаемой частоты сферической волны.

Вторая формула воспринимаемой частоты сферической волны

Дифференциал левой части выражения (1) равен

$$df(t) = \frac{\omega_0 t \cos \omega_0 t - \sin \omega_0 t}{t^2} dt.$$

Дифференциал правой, соответственно,

$$df(\omega) = \cos \omega t d\omega.$$

В соответствии с (1)

$$\frac{\omega_0 t \cos \omega_0 t - \sin \omega_0 t}{t^2} dt = \cos \omega t d\omega,$$

$$\int_{\tau}^t \frac{\omega_0 t \cos \omega_0 t - \sin \omega_0 t}{t^2} dt = - \int_{\omega_0}^{\omega} \cos \omega t d\omega,$$

$$\frac{\sin \omega_0 t}{t} \Big|_{\tau}^t = - \frac{\sin \omega t}{t} \Big|_{\omega_0}^{\omega}.$$

Знак «–» указывает на уменьшение частоты.

$$\begin{aligned} \frac{\sin \omega_0 t}{t} - \frac{\sin \omega_0 \tau}{\tau} &= - \frac{\sin \omega t}{t} + \frac{\sin \omega_0 t}{t}, \\ \frac{\sin \omega_0 \tau}{\tau} &= \frac{\sin \omega t}{t}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{t} \arcsin \frac{t \sin \omega_0 \tau}{\tau}. \quad (5)$$

$$t = \tau \Rightarrow \omega = \omega_0, \quad t \rightarrow \infty \Rightarrow \omega \rightarrow 0.$$

Полученное выражение – вторая формула воспринимаемой частоты сферической волны.

Частота ω , начиная с некоторого значения t , будет комплексной. Качественно представить этот феномен можно следующим образом. Если у плоской волны ее фронт не расширяется и поэтому некая локальная область фронта перемещается исключительно в продольном направлении, что ассоциируется с движением

по числовой оси, на которой λ – вещественная величина, то у сферической волны ее фронт *расширяется* и поэтому некая локальная область фронта перемещается и в продольном, и в поперечном направлении, что ассоциируется с движением в комплексной плоскости, в которой λ – комплексная величина. Тогда в соответствии с формулой

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda},$$

ω – тоже комплексная величина.

С другой стороны, значение $\sin \omega_0 \tau = 0$ на излучающей поверхности антенны вполне соответствует здравому смыслу. В этой связи для вещественных значений частоты в соответствии с (4) имеют место выражения

$$\sin \omega_0 \tau = 0 \Rightarrow \sin \omega t = 0 \Rightarrow \omega t = \omega_0 \tau,$$

$$\omega = \frac{\omega_0 \tau}{t}.$$

Третья формула воспринимаемой частоты сферической волны

Амплитуда сферической волны на расстоянии r от ее идеализированного точечного источника равна

$$E = \frac{E_0}{r} = \frac{E_0}{ct}. \quad (6)$$

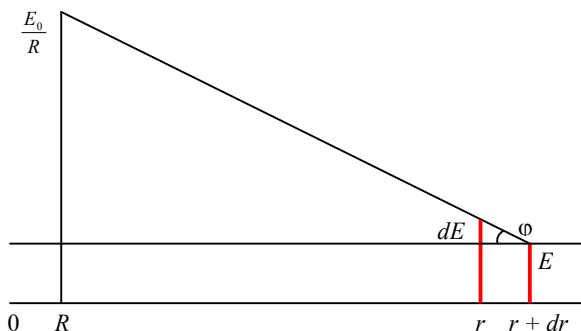
Ее дифференциал, соответственно,

$$dE = -\frac{E_0}{ct^2} dt. \quad (7)$$

Величина (6) может быть в соответствии с рисунком представлена следующим образом.

$$E = \frac{E_0}{R} - (r - R) \operatorname{tg} \varphi. \quad (8)$$

Другими словами, $E = f(\varphi)$, т.е. φ является определяющим параметром для E .



Уменьшение амплитуды соответствует ее движению

Из (8) следует

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{E_0/R - E}{r - R} = \frac{E_0/R - E_0/ct}{ct - R} = \\ &= E_0 \frac{ct - R}{Rc^2t^2 - R^2ct} = \frac{E_0}{Rct}. \end{aligned}$$

С другой стороны –

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{dE}{dr} = -\frac{E_0}{ct^2} \frac{dt}{dr} = -\frac{E_0}{ct^2} \frac{1}{v}, \\ v &= -\frac{E_0}{ct^2} \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} = -\frac{E_0}{ct^2} \frac{Rct}{E_0} = -\frac{R}{t} = -\frac{Rc}{r}, \\ dv &= \frac{Rc}{r^2} dr. \end{aligned} \quad (9)$$

Из полученных выражений следует, что уменьшение амплитуды фронта сферической волны (dE) (который в соответствии с принципом Гюйгенса служит источником вторичных волн) эквивалентно (по отношению к определяющему параметру φ) движению этого фронта со скоростью v в направлении противоположном распространению волны [8]. В этой связи следует учитывать эффект Доплера

$$\omega = \frac{\omega_0}{\gamma(1 + v/c)},$$

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 = \frac{\omega_0}{\gamma(1 + v/c)} - \omega_0 \approx$$

$$\approx \omega_0 - \omega_0 - \omega_0 v/c = -\frac{\omega_0}{c} v.$$

Или в дифференциальной форме

$$d\omega = -\frac{\omega}{c} dv.$$

С учетом (9)

$$d\omega = -\frac{\omega}{c} \frac{Rc}{r^2} dr = -\omega R \frac{dr}{r^2}.$$

$$\frac{d\omega}{\omega} = -R \frac{dr}{r^2}, \quad \ln \omega \Big|_{\omega_0}^{\omega} = \frac{R}{r} \Big|_R^r, \quad \ln \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{R}{r} - 1,$$

$$\omega = \omega_0 e^{\frac{R}{r} - 1}. \quad (10)$$

Полученная формула имеет сходство с (3), действительно,

$$\omega = \omega_0 e^{\frac{R}{r} - 1} = \omega_0 e^{\frac{1}{r}(R-r)} = \omega_0 e^{\frac{c}{r}(\tau-t)}.$$

$$r = R \Rightarrow \omega = \omega_0, \quad r \rightarrow \infty \Rightarrow \omega \rightarrow \frac{\omega_0}{e}.$$

Выражение (10) – третья формула воспринимаемой частоты сферической волны.

Заключение

Выражения для частоты сферической волны (3), (5), (10), полученные на основе различных математических моделей, существенно

различаются. В этой связи ключевую роль может сыграть эксперимент. При этом, как это часто бывает, каждая формула может иметь лучшее соответствие в определенной пространственной зоне [9, 10].

Воспринимаемая частота сферической волны в любом случае меньше исходной частоты излучения и уменьшается по мере удаления от источника, что обуславливается математическими особенностями спектра сферической волны.

Литература

1. Моделирование девиаций частоты декаметрового радиосигнала на трассе наклонного зондирования ионосферы / Е.Т. Агеева, Н.Т. Афанасьев, Д. Ким, Н.И. Михайлов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 1. С. 71–74.
2. Попов И.П. Комбинированные векторы и магнитный заряд // Прикладная физика и математика. 2018. № 6. С. 12–20. DOI: 10.25791/pfm.06.2018.329
3. Popov I.P. Mathematical modeling of the formal analogy of electromagnetic field // Applied mathematics and control sciences. 2016. № 4. Р. 36–60.
4. Воробьева Е.И., Немцов Р.А., Чураков П.П. Распознавание вида модуляции сигналов в системах радио-

мониторинга // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 4. С. 72–75.

5. Современные методы и задачи спектрального анализа сигналов: краткий обзор и сравнение / О.Е. Журилова, А.В. Башкиров, С.Ю. Белецкая, С.Н. Панычев, А.С. Костюков // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 128–131. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.016.

6. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой / С.В. Дворников, С.С. Дворников, С.С. Маненко, А.В. Пшеничников // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2. С. 87–93.

7. Токарев А.Б., Репников В.Д. Измерение занятости радиочастотного спектра в каналах с существенной вариацией длительности сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 4. С. 10–13.

8. Попов И.П. Фиксация скорости радиоволн // Двойные технологии. 2019. № 1 (86). С. 68–70.

9. Ромащенко М.А., Пряхин А.А. Методика анализа данных сканирования ближнего электромагнитного поля // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 4. С. 82–86.

10. Глотов В.В., Ромащенко М.А. Методика оценки ближнего электромагнитного поля методом эквивалентной модели // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 4. С. 44–47.

Поступила 30.05.2019; принята к публикации 29.07.2019

Информация об авторе

Попов Игорь Павлович – старший преподаватель, Курганский государственный университет (640020, Россия, г. Курган, ул. Советская, 63/4), e-mail: ip.popov@yandex.ru

EVOLUTION OF PERCEIVED FREQUENCY OF SPHERICAL WAVE

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

Abstract: it is established that the frequency of the electromagnetic wave perceived by the receiver does not always coincide with the frequency of the radiation. The most common example is the Doppler effect, which, however, is not the only possible cause of this discrepancy. When a wave is superposed, the perceived frequency is equal to the intermediate value of their frequencies, for example, the combination of blue and yellow is perceived as green. The electromagnetic wave emitted by a solitary point source is spherical. This is an amplitude modulated wave. In this regard, it is not monochromatic. The perceived frequency of the electromagnetic spherical wave is less than the radiation frequency. The higher the radiated frequency ω_0 and the distance between the source and the receiver, the greater the difference between the radiated and the perceived frequencies. Three formulas for the frequency of a spherical electromagnetic wave are obtained on the basis of various mathematical models. In this regard, the experiment can play a key role. In addition, each formula can have a better fit in a particular spatial zone. The perceived frequency of a spherical electromagnetic wave is in any case less than the original radiation frequency and decreases with distance from the source, which is caused by the mathematical features of the spectrum of a spherical electromagnetic wave

Key words: source, receiver, radiation, wave, frequency, spectrum

References

1. Ageeva E.T., Afanas'ev N.T., Kim D., Mikhaylov N.I. "Simulation of frequency deviations of a decameter radio signal on the route of oblique sounding of the ionosphere", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 1, pp. 71–74.

2. Popov I.P. "Combined vectors and magnetic charge", *Applied Physics and Mathematics (Prikladnaya Fizika i Matematika)*, 2018, no. 6, pp. 12–20.
3. Popov I.P. "Modeling of the formal field of analogy of the electromagnetic field", *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2016, no. 4, pp. 36–60.
4. Vorobyeva E.I., Nemtsov R.A., Churakov P.P. "Recognition of the type of modulation of signals in radio monitoring systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 72–75.
5. Zhurilova O.E., Bashkirov A.V., Beletskaya S.Yu., Panychev S.N., Kostyukov A.S. "Modern methods and tasks of spectral analysis of signals: a brief overview and Comparison", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 128–131.
6. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Manaenko S.S., Pshenichnikov A.V. "Spectral-effective signals with a continuous phase", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 87–93.
7. Tokarev A.B., Repnikov V.D. "Measurement of employment of the radio frequency spectrum in channels with a significant variation in the duration of the signals", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 4, pp. 10–13.
8. Popov I.P. "Fixing the speed of radio waves", *Dual Technologies (Dvoynye Tekhnologii)*, 2019, no. 1 (86), pp. 68–70.
9. Romashchenko M.A., Pryakhin A.A. "Methods of analyzing the scanning data of the near electromagnetic field", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 82–86.
10. Glotov V.V., Romashchenko M.A. "Methods for assessing the near-electromagnetic field by the method of the equivalent model", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 44–47.

Submitted 30.05.2019; revised 29.07.2019

Information about the author

Igor' P. Popov, Assistant Professor, Kurgan State University (63/4 Sovetskaya str., Kurgan 640020, Russia), e-mail: ip.popov @yandex.ru

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ КАРТ БЛИЖНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДВУХСТОРОННИХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**М.А. Ромашенко, А.Л. Неклюдов, Д.В. Васильченко****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: в современном мире при стремительно развивающейся радиоэлектронной промышленности электромагнитная совместимость устройств для обеспечения их безотказной работы играет наиважнейшую роль. На этапе проектирования и выпуска прототипов образцов производится ряд тестов, в том числе и тесты на электромагнитную совместимость. Однако все существующие методы являются дорогостоящими и малоэффективными во множестве факторов. В данной статье рассмотрены метод испытания радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при помощи сканера электромагнитных полей, а также его конструкция. Такие сканеры имеют высокую точность измерений и низкую себестоимость по сравнению с другими методами испытаний. Основными недостатками подобных сканирующих устройств являются невозможность сканирования испытуемого изделия с изменением высоты и, как следствие, низкая достоверность результатов измерений. Предложенная конструкция сканера в сочетании с программным обеспечением (ПО) имеет возможность построения карты высот, что увеличивает достоверность полученных результатов и ускоряет процесс испытания изделия. В результате на экране ПК нам представляется 3D-модель электромагнитных излучений испытуемого образца. По ней можно не только узнать, в какой части печатной платы находится точка с наибольшей напряженностью электрического поля, но и расстояние до неё

Ключевые слова: электромагнитная совместимость РЭС, сканер ближнего электромагнитного поля, ближнее электромагнитное поле, датчик расстояния

Введение

Широкое распространение электроники и её минимизация приводят к необходимости учитывать возможные проблемы в области электромагнитной совместимости (ЭМС) на всех стадиях проектирования и эксплуатации электронных изделий. Для получения данных об излучении того или иного устройства проводится ряд испытаний в безэховых или «полубезэховых» камерах [1], что влечет за собой увеличение себестоимости готовой продукции. Таким образом, одним из перспективных походов к решению этой проблемы является применение иного способа для определения излучения РЭС, а именно - специализированного программно-аппаратного комплекса - сканера ближнего электромагнитного поля.

Данный сканер представляет собой устройство для сканирования ближнего электрического или магнитного поля источников электромагнитного излучения и может быть использован при автоматическом измерении напряженности полей для решения задач обеспечения электромагнитной совместимости при проектировании, диагностике, тестировании и испытании как отдельных печат-

ных узлов, так электронных устройств и приборов в целом.

Постановка задачи

В настоящее время существует множество сканеров ближнего электромагнитного поля различных производителей (EMSCAN, MI TECHNOLOGIES и т.д.). Вышеперечисленные устройства производят сканирование электромагнитного поля платы, установленной в определенной области, при помощи чувствительных элементов (датчиков электромагнитного поля). Однако реализация такого метода у данных производителей обладает существенным недостатком - отсутствием возможности измерения с изменением высоты от датчика поля до диагностируемого устройства, т.е. невозможность проведения трехмерного сканирования. Ещё одним недостатком является невозможность измерения электромагнитного поля с обратной стороны от радиоэлементов печатной платы, вследствие чего усложняется задача определения излучающего элемента, а в некоторых случаях даже отсутствует возможность его определения.

Структурная схема сканера ближнего электрического поля представлена на рис. 1.

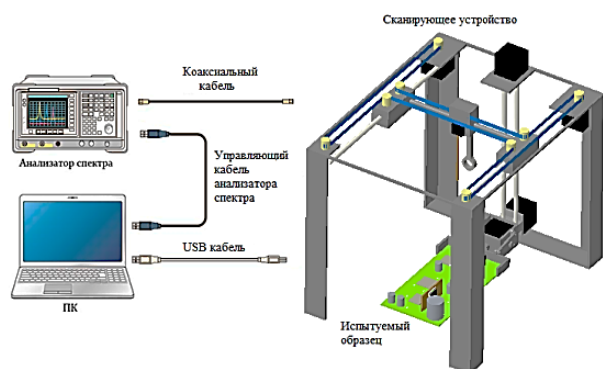


Рис. 1. Структурная схема

Принцип действия данного устройства заключается в следующем. С помощью специализированного программного обеспечения пользователь на ПК задает необходимые параметры сканирования испытуемого объекта. К таким параметрам относятся его размеры, необходимый шаг сканирования, необходимое удаление от датчика поля до измеряемого объекта, необходимые частоты сканирования, а также количество сканируемых сторон изделия. Далее происходит автоматическое составление «карты высот» для испытуемого изделия путём последовательного перемещения датчика расстояния с выбранным шагом и определение указанного ранее удаления от чувствительного элемента до испытуемого образца. После завершения составления «карты высот» датчик возвращается в начало координат и ожидает команды к запуску сканирования. После её получения, сканирующее устройство последовательно перемещает датчик электрического поля с датчиком расстояния на определенный шаг (заданный пользователем) вдоль координатных осей с расстоянием до исследуемого объекта, соответствующим карте высот. В каждой узловой точке снимаются параметры электрического или магнитного поля в частотной области. Полученные данные по коаксиальному кабелю поступают в анализатор спектра, а затем в ПК, где представляются в виде цветовой карты распределения напряженности ближнего поля и совмещаются с оптическим или трехмерным изображением испытуемой печатной платы или блока. Пример отображения результатов представлен на рис. 2.

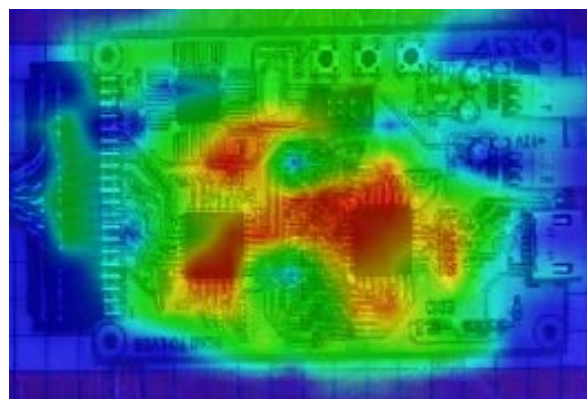


Рис. 2. Визуализация измерений

В результате, разработчик может заранее узнать о местах потенциальных проблем в части электромагнитной совместимости и принять необходимые меры по их устранению ещё на этапе макетирования. Изменяя шаг сетки, можно настраивать требуемое соотношение скорость/точность измерения.

Преимуществами разрабатываемого изделия перед конкурентами являются ускорение процесса тестирования, повышение точности вычисления напряженностей полей, а также степени воспроизводимости результатов измерений при решении задач электромагнитной совместимости за счёт применения нового подхода к сканированию, заключающегося в применении датчика расстояния в конструкции изделия.

Фактически работа датчика расстояния сводится к тому, что прибор посылает сигнал (лазерный луч, ультразвуковое излучение, ИК-луч или магнитный поток) и в конечном итоге получает два результата: расстояние до конечной точки и расстояние до первоначальной его стороны. Так, при разности этих двух замеров можно получить расстояние до объекта. Именно это значение и будет использоваться при расчетах объекта и составлении «карты высот».

На данный момент на отечественном рынке специального оборудования можно приобрести различные виды датчиков расстояния. Наиболее популярными являются лазерные, ультразвуковые и инфракрасные.

Реализация аппаратной части датчика расстояния и датчика электрического поля показана на рис. 3.

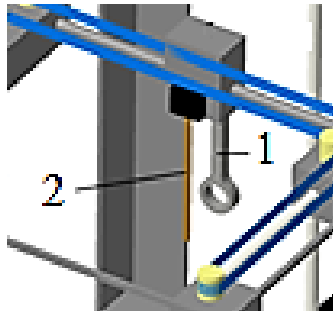


Рис. 3

Датчик электрического поля 1 и датчик расстояния 2 закреплены на подвижной каретке с возможностью перемещения в плоскостях X и Y.

Методика построения карт высот

Методика построения градиентных карт ближнего электромагнитного поля заключается в:

- 1) построении карты высот исследуемой области;
- 2) группировании областей со схожими высотными характеристиками;
- 3) выделении областей с наибольшей плотностью поверхностного монтажа и дополнительным их исследованием;
- 4) обработке и аппроксимировании полученных данных с помощью программного обеспечения для сканера ближнего электромагнитного поля;
- 5) измерении электромагнитного поля и построении градиентных карт напряженностей.

В специальной программе для управления сканером (рис. 4) задаются геометрические размеры исследуемой платы и минимальное расстояние до исследуемого объекта (рис. 5) для обеспечения безопасного перемещения датчика ближнего поля над исследуемым образцом.

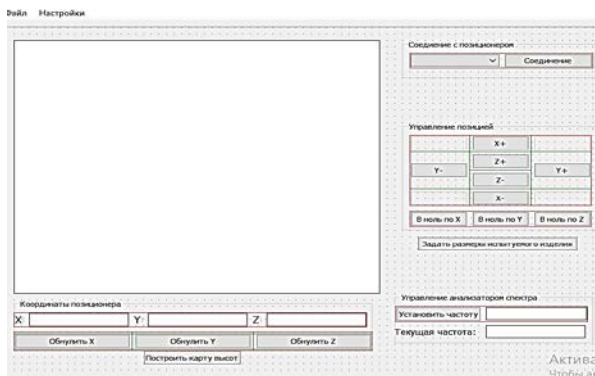


Рис. 4. Внешний вид управляющей программы

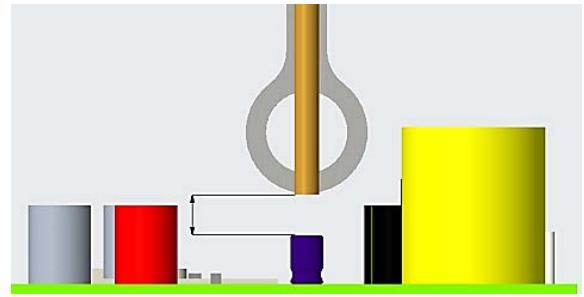


Рис. 5. Измерение расстояния до исследуемого объекта

Также в программном обеспечении задаются нулевые координаты путем постановки держателя с датчиком расстояния в необходимую точку испытуемого изделия и обнуления текущих координат позиционера (данная операция необходима для сопоставления физической модели платы и её трехмерной модели, загруженной в ПО). Далее указываются шаг сетки и узловые точки определения высот в соответствии с необходимыми параметрами измерения.

ПО сканера позволяет оператору в ручном режиме задать области с наибольшей плотностью поверхностного монтажа и индивидуальный шаг сетки для них. Уменьшение шага сетки влечет за собой не только увеличение точности исследования, но и увеличение времени тестирования.

После задания всех необходимых параметров, в автоматическом режиме происходит построение карты высот и занесение их в таблицу, а также для последующей визуализации (при отсутствии трёхмерной модели испытуемого изделия) создается абстрактная модель путём съёмки испытуемого образца с разных сторон при помощи фотокамер рис. 6.

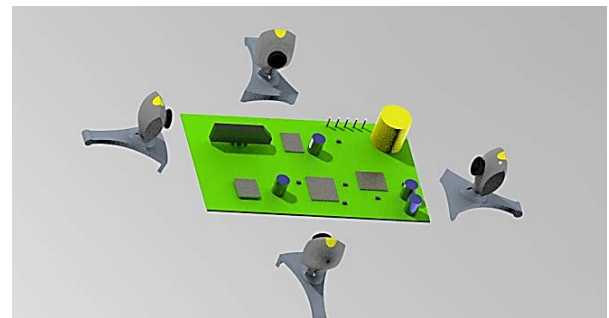


Рис. 6. Создание абстрактной модели

Данная операция необходима для визуализации градиентных карт ближнего электромагнитного поля с каждой из сторон печатной платы.

Следующая операция - генерация gcod файла, в котором находятся координаты перемещений держателя с датчиком ближнего поля по тестируемому образцу.

В управляющей программе в меню «управление анализатором спектра» необходимо задать диапазон исследуемых частот и шаг изменения частоты. После определения всех характеристик запускается сканирование, которое происходит в автоматическом режиме. По окончании данного этапа ПО производит обработку полученных результатов с графическим отображением на ранее загруженной трехмерной модели изделия или же на созданной абстрактной модели.

Визуализация построения градиентных карт ближнего электромагнитного поля показана на рис. 7.

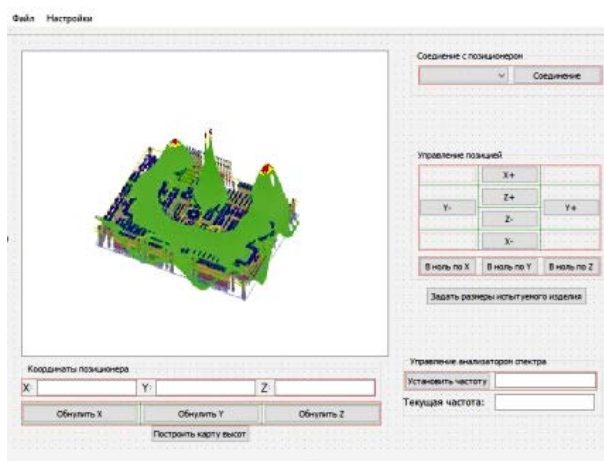


Рис. 7

Поступила 06.06.2019; принята к публикации 29.07.2019

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kipt@vorstu.ru

Неклюдов Андрей Львович – магистр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: an.necludov@yandex.ru

Васильченко Дмитрий Владимирович – магистр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kipt@vorstu.ru

TECHNIQUE OF CONSTRUCTION OF GRADIENT CARDS OF THE NEAR ELECTROMAGNETIC FIELD OF BILATERAL AND MULTILAYERED PCB

M.A. Romashchenko, A.L. Neklyudov, D.V. Vasil'chenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in the modern world, with rapidly developing electronic industry, electromagnetic compatibility of devices plays a crucial role to ensure their trouble-free operation. At the stage of designing and sample prototypes production, a number of tests are performed, including tests for electromagnetic compatibility. However, all existing methods are expensive and ineffective in many ways. The article describes the method of testing electronic equipment (EE) using the scanner's electromagnetic fields, as well as its design. These scanners have high accuracy and low cost compared with other test methods. The main

Заключение

Таким образом, преимуществами разрабатываемого изделия являются: ускорение процесса тестирования, повышение точности вычислений напряженностей полей, а также степени воспроизводимости результатов измерений при решении задач электромагнитной совместимости за счёт применения нового подхода к сканированию, заключающегося в применении датчика расстояния в конструкции изделия.

Литература

1. Кремер И.Я. Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов. М.: Сов. Радио, 1972.
2. Ромашенко М.А. Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 4. С. 95-109.
3. Макаров О.Ю. Основные принципы применения программных средств при решении задач обеспечения ЭМС и помехоустойчивости//Радиотехника. 2013. № 3. С. 76- 82.
4. Марков Ю.В. Проектирование устройств приема и обработки сигналов: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. С.39-45.

disadvantages of such scanning devices are the impossibility of scanning the test item by changing the height and, consequently, low reliability of measurement results. The proposed design of the scanner in combination with software has the ability to build height maps, which increases the accuracy of the results and speeds up the testing process of the product. As a result, we can see a 3D model of electromagnetic radiation of the test sample on the PC screen. It is possible not only to know what part of the PCB is the point of greatest electric field intensity but also the distance to it

Key words: electromagnetic compatibility of RES, scanner of the near electromagnetic field, near electromagnetic field, distance sensor

References

1. Kremer I.Ya. "Modulating (multiplicative) interference and radio reception" ("Moduliruyushchie (multiplikativnye) pomekhi i priyem radiosignalov"), Moscow, Sov. Radio, 1972.
2. Romashchenko M.A. "The main objectives of the analysis of the provision of EMC in the construction of the RES and the principles of its implementation", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 95-109.
3. Makarov O.Yu. "The basic principles of the use of software in solving problems of EMC and noise immunity", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2013, no. 3, pp. 76-82.
4. Markov Yu.V. "Designing devices for receiving and processing signals. Study guide" ("Proyektirovanie ustroystv priyema i obrabotki signalov: ucheb.-metod. posobie"), Ekaterinburg, Publishing house Ural, 2015, pp.39-45.

Submitted 06.06.2019; revised 29.07.2019

Information about the authors

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

Andrey L. Neklyudov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: an.necludov@yandex.ru

Dmitriy V. Vasil'chenko, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ПОЛУСТОХАСТИЧЕСКИЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ ДЕКОДЕР ДЛЯ LDPC-КОДОВ

М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлен релаксационный полустохастический (РП) с низкой плотностью проверки на четность (от англ. low-densityparity-check, LDPC) алгоритм декодирования, который использует некоторые элементы алгоритма суммарного произведения (от англ. thesum-product algorithm, SPA) в своих переменных узлах, но поддерживает перемежитель низкой сложности и структуру проверочного узла, характерную для стохастических декодеров. Алгоритм основан на принципе последовательной релаксации для преобразования двоичных стохастических потоков в представление логарифмического отношения правдоподобия (LLR). Переменные узлы используют метод, аналогичный последовательной релаксации для оценки текущего значения входящих стохастических потоков. Моделирование (2048, 1723) кода RS-LDPC показывает, что релаксационный полустохастический алгоритм может превосходить 100-итерационное декодирование sum-product алгоритма с плавающей точкой. Представлены подходы для реализации релаксационного полустохастического алгоритма с низкой сложностью. Кроме того, показано, как стохастическая природа распространения доверия может быть использована для снижения уровня ошибок. Свойства случайной сходимости являются естественной частью всех стохастических декодеров и играют важную роль в улучшении существующих алгоритмов итеративного декодирования, делают их еще более привлекательными для высокоскоростных приложений с низким BER. Исследована упрощенная реализация алгоритма с фиксированной запятой, производительность которого близка к идеальному алгоритму

Ключевые слова: стохастическое декодирование, низкоплотностный декодер, проверочный и переменный узлы, sum-product алгоритм

Введение

Стохастическое декодирование было введено как альтернатива алгоритму суммарного произведения (SPA) с низкой сложностью, который потенциально мог достичь аналогичной производительности. Тем не менее, только декодирование коротких кодов привело к желательной производительности. Затем был усовершенствован алгоритм стохастического декодирования, чтобы добиться хорошей производительности декодирования для больших кодов [1, 2].

Привлекательность стохастических декодеров состоит в том, что им требуется только два соединения на двунаправленный край графа Таннера, поэтому используется соединение схемы в его простейшем выражении. Узлы проверки также чрезвычайно просты и содержат только ячейки XOR(ИЛИ-НЕ). Эта структура делает возможным рассмотрение полностью параллельных реализаций длинных кодов. Контрольные узлы для декодеров SPA и алгоритма с минимальной суммой (MSA) этого кода имеют различные реализации даже для последовательных битовых декодеров MSA. В дополнение к низкой сложности еще одним

важным преимуществом стохастических декодеров является возможность добавлять этапы конвейера на некоторых или на всех этапах перемежителя, не влияя на эффективность исправления ошибок. Это обеспечивает более высокую тактовую частоту, а для реализации ASIC может облегчить компоновку и маршрутизацию.

Основываясь на простой проверке узлов и структуре перемежителя, мы искали способ улучшения производительности по битовой частоте ошибок (BER) в стохастических декодерах. В статье представлен релаксационный полустохастический алгоритм декодирования, который обрабатывает сообщения проверочных узлов, используя методы стохастического декодирования, и сообщения переменных узлов, используя обновление переменных узлов SPA (и MSA). Здесь приводится метод для эффективного преобразования сообщений между стохастическим и вероятностным (и логарифмически-правдоподобным) представлениями. В отличие от предыдущих достижений, которые представляют вероятности фиксированным числом битов в стохастическом пакете и имеют значительное ухудшение BER, наш алгоритм не пакетизируется и работает на побитовой основе, обновляя сообщения вероятности в переменных узлах, основан на принципе по-

следовательной релаксации. Моделирование показывает, что алгоритм РП значительно улучшает производительность BER, превосходя алгоритм суммирования произведений с плавающей запятой [3].

Стохастическое декодирование

Стохастические декодеры представляют информацию о вероятности в форме двоичных стохастических потоков, то есть случайных последовательностей Бернулли произвольной длины, а информация, содержащаяся в последовательности, является ее статистикой первого порядка. Это полезно, когда средняя функция потока интерпретируется как вероятность. В этом случае могут быть разработаны переменные и проверочные узлы низкой сложности. Несмотря на простую реализацию, стохастическое представление потока может иметь произвольную точность, и по этой причине стохастическое декодирование было предложено как альтернатива для декодирования SPA низкой сложности.

Учитывая функцию проверки узла степени 3 (два входа и один выход), пусть ожидаемое значение текущих входных битов будет p_0 и p_1 . Применяя функции XOR на входах ожидаемое значение выхода равно $p_{out} = p_0q_1 + q_0p_1$ (где $q_i = 1 - p_i$), что является точной функцией проверки узла SPA в области вероятности. Поскольку функция не ссылается ни на какие предыдущие значения входных потоков, она остается действительной для нестационарных потоков. Функция легко расширяется до узлов более высокой степени путем объединения нескольких узлов степени 3.

Для работы с переменным узлом был предложен ряд функций, одна из которых приведена ниже. Эта функция определена для переменного узла степени 3 (входы $\{a, b\}$, выход

с) и имеет только 1 бит состояния. Легко показать, что если каждый входной поток предполагается стационарным, ожидаемое значение выходного потока представляет желаемую вероятность.

$$c_i = \begin{cases} a_i, & \text{если } a_i = b_i \\ c_{i-1}, & \text{иначе} \end{cases}$$

Релаксационный полустохастический алгоритм

Как было отмечено, разрыв между производительностью SPA с плавающей точкой и стохастическим декодированием обусловлен реализацией переменных узлов. Алгоритм RHS повышает точность работы переменного узла за счет извлечения информации в стохастическом потоке и выполнения точных операций в области LLR. Под точными операциями мы подразумеваем, что функция переменного узла SPA используется напрямую. Остальная часть декодера остается стохастической, и обмен информацией между переменными и контрольными узлами происходит в виде стохастических потоков. Переменный узел в РП алгоритме создается путем расширения узла переменных SPA для обработки входящих стохастических потоков и преобразования их в значения LLR, чтобы иметь возможность генерировать стохастические потоки на выходе. Переменный узел RHS создается путем расширения узла переменных SPA для обработки входящих стохастических потоков и преобразования их в значения LLR, чтобы иметь возможность генерировать стохастические потоки на выходе. Результирующая функциональность переменного узла проиллюстрирована на рис. 1.

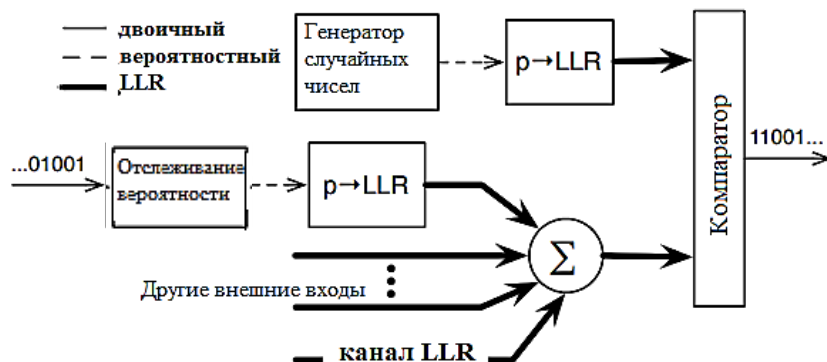


Рис. 1. Функциональное представление переменного узла. Показан только один вход и один выход

Результаты моделирования для релаксационного полустохастического алгоритма

Структура моделирования состоит из случайного источника с кодером, модуляции / демодуляции BPSK и канала AWGN. Все моделирования выполняются с максимум 1000 циклами декодирования с использованием досрочного завершения. Цикл декодирования соответствует 1 биту, обрабатываемому переменными узлами, отправляемому на контрольные узлы и отправляемому обратно переменным узлам. Отметим, что цикл декодирования в алгоритме стохастического декодирования не эквивалентен итерации в алгоритме передачи сообщений таким, как SPA. Для моделирования используется (6, 32) - регулярный код LDPC на основе RS размером 2048 и скоростью 0,84 с обхватом 6. Этот код был выбран в недавнем стандарте IEEE 802.3an для 10-Гбит / с Ethernet через кабели CAT6. Описанный здесь декодер представлен с плавающей точкой [4].

Влияние коэффициента релаксации β представлено установочными кривыми на рис. 2. Кривые показывают частоту ошибок кадра декодера как функцию максимального количества циклов декодирования (от англ. Decodingcycles, DC) при 4,2 дБ. Когда максимальное число DC находится приблизительно между 115 и 740, наилучшая производительность достигается при $\beta = 1/16$, тогда как $\beta = 1/32$ немного лучше, когда предел DC выше 740. С другой стороны, декодер сходится быстрее в среднем для более высоких значений β , как показано, когда начальная часть кривых находится слева. Среднее число циклов декодирования при 4,2 дБ составляет 20 в случае $\beta = 1/8$ и 30 для $\beta = 1/16$. Используя $\beta = \{1/4, 1/8, 1/16\}$ в последовательности в течение процесса декодирования, это число может быть уменьшено до 15 без какого-либо снижения производительности декодирования. Кривая, показанная на рис. 2, использует $\beta = 1/4$ для циклов [0, 33], $\beta = 1/8$ для циклов [34, 110], а затем $\beta = 1/16$. Глядя на график, мы можем предположить, что дополнительные циклы декодирования обеспечат небольшую дополнительную производительность.

Показатель BER РП-декодера показан на рис. 3 вместе с SPA с плавающей запятой с 100 итерациями и 5-битной демодуляцией. Кривая, называемая «ASPA», представляет собой декодер «приближенного SPA со смещением» с 4-битным квантованием. На рисунке представ-

лена 7-битная реализация SPA, представленная в [5], а также стохастический декодер, разработанный в соответствии с архитектурой, представленной в [6]. Этот декодер моделируется с помощью 64-битных запоминающих устройств с ограничением в 1000 циклов декодирования. В области спада, при BER 10^{-8} , РП-декодер превосходит все другие декодеры, но самое главное 100 итераций SPA с плавающей точкой. Стоит отметить, что моделирования подтверждают, что РП-декодер соответствует производительности оптимизированного релаксационного SPA при использовании достаточно малого фактора релаксации.

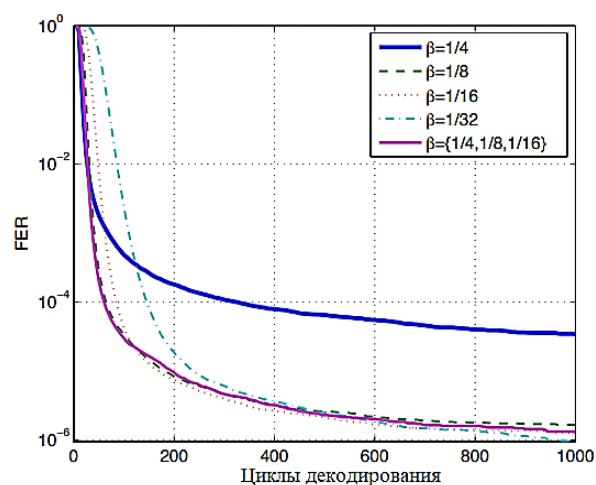


Рис. 2. Декодирование сходимости РП-декодера при 4,2 дБ

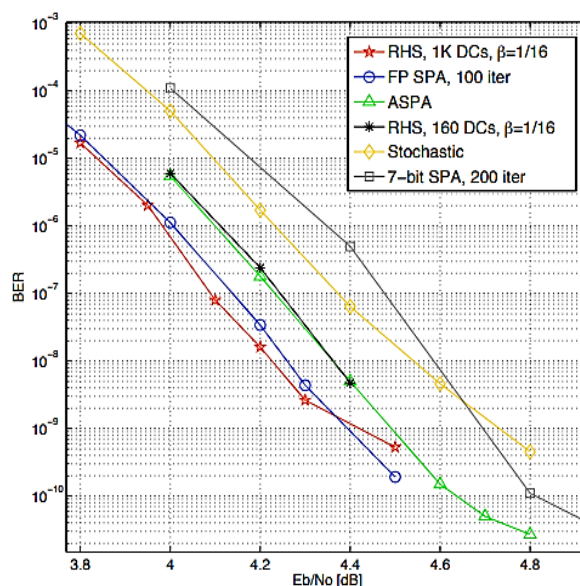


Рис. 3. Производительность BER РП-декодера с использованием 100 или 160 циклов декодирования по сравнению с другими подходами

На рис. 4 показано, что метод перекодирования может значительно снизить минимальный уровень ошибок РП-декодера. Решение проблемы минимального уровня ошибки также было представлено в [7], где была введена методика постобработки, основанная на предварительной характеристике наборов перехвата кода. Постобработка выполняется путем применения тщательно выбранных смещений к сообщениям вблизи не учтенных контрольных узлов. Производительность этого ASPA-декодера с постобработкой также показана на рис. 4. При 4,5 дБ производительность, достигнутая РП-декодером, эквивалентна производительности, полученной с помощью метода постобработки. Предел ошибок РП с повторным декодированием ниже, чем SPA, и имеет ту же форму. При более низких коэффициентах ошибок кадров наблюдаемая тенденция указывает на то, что РП-декодер будет превосходить декодер ASPA с постобработкой.

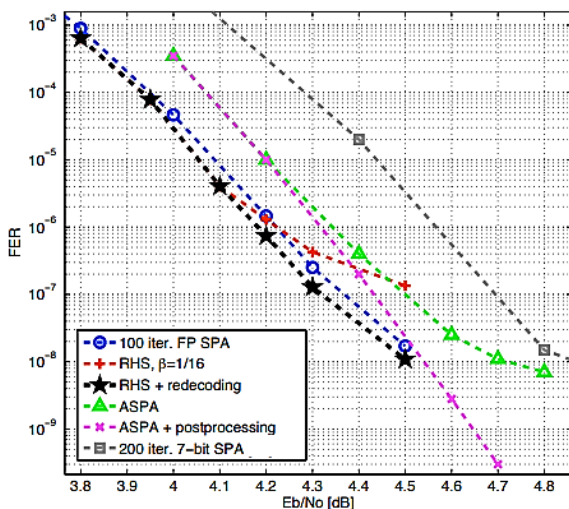


Рис. 4. Влияние метода перекодирования на частоту ошибок кадра РП-декодера

Заключение

Мы представили алгоритм стохастического декодирования для кодов LDPC, который имеет два основных новых аспекта. Во-первых, переменные узлы используют метод, аналогичный последовательной релаксации, для оценки текущего значения входящих стохастических потоков. Вместе с использованием операций в области LLR это создает очень точный стохастический переменный узел, о чем свидетельствуют отличные характери-

ки исправления ошибок, полученные на рис. 4. Во-вторых, мы показали, как случайное поведение сходимости декодера может быть использовано для снижения минимального уровня ошибок, который ограничивает производительность декодирования при высоких SNR. Затем была представлена упрощенная реализация с фиксированной запятой, производительность которой близка к идеальному алгоритму. Несмотря на повышенную производительность, РП-декодер сохраняет преимущества других стохастических декодеров в отношении реализации высокоскоростных полностью параллельных декодеров. Минимальный переключатель, простые проверочные узлы и возможность произвольного конвейерного переключения являются большими преимуществами в этом декодере.

Свойства случайной сходимости могут играть важную роль в улучшении существующих алгоритмов итеративного декодирования для преодоления структурных недостатков в кодах. Тот факт, что эти свойства являются естественной частью всех стохастических декодеров, делает их еще более привлекательными для высокоскоростных приложений с низким BER.

Литература

1. Ali Nandrei, ShieMannor, Mohamad Sawan Warren J. Gross. Relaxed stochastic decoder of LDPC codes // IEEE transaction on signal processing. 2011. Vol. 59. Pp. 5617-5626.
2. Хорошайлова М.В. Verilog-описание и реализация на пЛИС LDPC-декодера для высокоскоростной передачи данных / М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 120-124.
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. 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.
5. Design of LDPC decoders for low error rate performance / Z. Zhang, L. Dolecek, B. Nikolic, V. Anantharam, and M. Wainwright // submitted to IEEE Trans. Comm., www.eecs.berkeley.edu/~ananth/2008+/TCOM0303.pdf
6. Sharifi Tehrani S., Mannor S. and Gross W. Fully parallel stochastic LDPC decoders // IEEE Trans. on Signal Processing. 2008. Vol. 56. № 11. Pp. 5692-5703.
7. Lowering LDPC error floors by postprocessing / Z. Zhang, L. Dolecek, B. Nikolic, V. Anantharam, and M. Wainwright // In Proc. of Globecom. 2008. Pp. 1-6.

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна – ассистент, 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: riss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

RELAXATION ITERATION SEMISTOCHASTIC DECODERS FOR LDPC CODES

M.V. Khoroshaylova, I.V. Sviridova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents a semi-stochastic relaxation (SSR) with a low density parity check (LDPC) decoding algorithm that uses some elements of the sum-product algorithm (SPA) in its variable nodes, but it maintains a low complexity interleaver and a check node structure characteristic of stochastic decoders. The algorithm is based on the principle of sequential relaxation to convert binary stochastic flows into a log-likelihood ratio (LLR) representation. Variable nodes use a method similar to sequential relaxation to estimate the current value of incoming stochastic flows. Modeling (2048, 1723) of the RS-LDPC code shows that a relaxation semi-stochastic algorithm can exceed 100-iterative decoding of the sum product floating-point algorithm. The work presented approaches for the implementation of a relaxation semi-stochastic algorithm with low complexity. In addition, it shows how the stochastic nature of the propagation of trust can be used to reduce the level of errors. Random convergence properties are a natural part of all stochastic decoders and play an important role in improving the existing iterative decoding algorithms, making them even more attractive for high-speed applications with low BER. Also the article studies a simplified implementation with a fixed comma, the performance of which is close to the ideal algorithm

Key words: stochastic decoding, low-density decoder, check and variable nodes, sum-product algorithm

References

1. Nandrei A., Mannor S., Sawan M., Gross W.J. "Relaxed stochastic decoder of LDPC codes", *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2011, vol. 59, pp. 5617-5626.
2. Khoroshaylova M.V. "Verilog description and implementation on the FPGA LDPC decoder for high-speed data transmission", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp.120-124
3. Khoroshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp.99-105
4. Bashkirov A.V. "Use forced to reduce the convergence complexity LDPC decoding", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 69-73
5. Zhang Z., Dolecek L., Nikolic B., Anantharam V., Wainwright M. "Design of LDPC decoders for low error rate performance," submitted to *IEEE Trans. Comm.*, available at: www.eecs.berkeley.edu/~ananth/2008+/TCOM0303.pdf
6. SharifiTehrani S., Mannor S., Gross W., "Fully parallel stochastic LDPC decoders," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Nov. 2008, vol. 56, no. 11, pp. 5692–5703
7. Zhang Z., Dolecek L., Nikolic B., Anantharam V., Wainwright M. "Lowering LDPC error floors by postprocessing", *Proc. of Globecom 2008*, Dec. 2008, pp. 1–6.

Submitted 09.06.2019; revised 29.07.2019

Information about the authors

Marina V. Khoroshaylova, Assistant, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), pmv2205@mail.ru, tel. 8-910-732-66-13, ORCID: <https://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>

ИТЕРАТИВНАЯ МЕТОДИКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ПРИЕМА QAM-СИГНАЛОВ

О.Н. Чирков, А.О. Кузнецова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описан итеративный турбоприемник для изменяющихся во времени каналов замирания, работа которого строится на основе оценки смещения канала и частоты вместе с обнаружением сигнала и декодированием данных. В работе были проанализированы оценки Байеса, максимального правдоподобия и регуляризованного максимального правдоподобия в зависимости от того, насколько доступны различные показатели статистики канала радиосвязи, а также представлены результаты моделирования, показывающие возможности дальнейшего развития технологий. Рассмотрены различные подходы для получения наибольшей производительности, выявлены положительные и отрицательные стороны каждого из них, представлен усовершенствованный алгоритм работы на базе турбосистемы модуляции QAM посредством увеличения числа перемежателей. Совместная оценка канала и обнаружение QAM-сигнала основаны на представлении модели расширения базы времени затухания. Для отслеживания частотного сдвига использовалась дихотомическая методика поиска. Информация, генерируемая в турбокоде, используется для увеличения эффективности предложенной методики в последующих итерациях. Результаты моделирования показали, что модели помехоустойчивого приема QAM-сигналов, предлагаемые в данной работе, имеют крайне высокую производительность, при этом используют меньшую статистическую информацию о радиоканале связи

Ключевые слова: приемник, итеративная оценка, результирующая оценка, канал, декодер

Введение

В современных условиях постоянного развития и оптимизации технологий передачи информации динамично развивается разработка приемников, позволяющих использовать итеративный подход в турборежиме для изменяющихся во времени радиоканалов. С помощью устройств помехоустойчивого приема сигналов, работающих по рассмотренной методике, появляется возможность совместно выполнить оценку изменения канала и частоты сдвига вкупе с обнаружением и расшифровкой данных. Совместная оценка может строиться по трем критериям: байесовская оценка (БО), максимум правдоподобия (МП) и вероятность регуляризованного максимума правдоподобия (РМП). В зависимости от количества доступной статистики канала, применяется оптимальная схема оценки канала связи. Для получения данных используется модель базового расширения колебаний времени замирания, а также метод дихотомического поиска. Турбодекодеры используют для снижения погрешностей при совместной оценке замирающих каналов.

Для изменяющихся во времени каналов используются различные варианты оценки частотного сдвига. Основная проблема состоит в том, что большая часть этих методик обладает узким диапазоном получения частоты либо

другими ограничениями. Приемники с символьной программной модуляцией (СПМ) используют разнообразные методы обработки сигнала в турборежиме [1]. Принцип помехоустойчивого обнаружения сигналов в таких приемниках основан на формировании итеративной оценки из декодера со слабым входным сигналом. Однако в работе [1] и большом количестве других исследований не берется во внимание возможное присутствие сдвига частоты. Далее приведем расчет итерационных турбоприемников для систем с символьной программной модуляцией и QAM-сигналов, которые показывают высокую эффективность, принимая во внимание изменение во времени канала и смещение частоты.

Современный метод оценки канала

Для того чтобы показать преимущества предлагаемой методики помехоустойчивого приема, кратко рассмотрим систему с символьной программной модуляцией, суть которой заключается в том, что пакет из N символов передается по частотно-плоскому каналу, изменяющемуся во времени. Переданный пакет состоит из N_d данных и N_p пилотных символов. При этом пилотные данные чередуются между каждым $T - 1$ символом с данными. Отсюда выборка принятого сигнала моделируется как

$$r(nT_s) = s(nT_s)h(nT_s) + z(nT_s), \quad (1)$$

где $s(nT_s)$ - передаваемый сигнал, $z(nT_s)$ - гауссовский шум, T_s - интервал символа.

Принятый сигнал и модель канала соответственно могут быть записаны в матричной форме как [2]

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}\mathbf{h} + \mathbf{z}, \quad (2)$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{\Lambda}_{f_0 T_s} \mathbf{g}, \quad (3)$$

где $\mathbf{r}, \mathbf{h}, \mathbf{g}$ и $\mathbf{z}$ - $N \times 1$ столбцы векторов с элементами $r(nT_s), h(nT_s), z(nT_s)$.

Такой подход к оценке радиоканала не является оптимальным, поскольку рассчитан для ограниченного инварианта времени.

Зададим оценку смещения частоты по следующей формуле [3]

$$\begin{aligned} \widehat{f_0 T_s} &= \arg \max_{f T_s \in \Psi\{Y_{f T_s}\}} \\ &= \arg \max_{f T_s \in \Psi\{\mathbf{W}_{f T_s}^H (\mathbf{\Gamma} + \mathbf{\Upsilon})^{-1} \mathbf{W}_{f T_s}\}} \end{aligned} \quad (4)$$

где символ $[\cdot]^H$ обозначает эрмитово сопряжение, $\Psi = [-\psi/2, \psi/2]$ - частота получения в диапазоне $0 < \psi \leq 1$, $Y_{f T_s}$ - обобщенная периодограмма. Коэффициенты $\mathbf{W}_{f T_s}$, $\mathbf{\Gamma}$, и $\mathbf{\Upsilon}$ зависят от того, сколько статистики канала доступно.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{f T_s} &= \Phi^H \mathbf{\Lambda}_{f T_s}^H \mathbf{r}, \\ \mathbf{\Gamma} &= \Phi^H \Phi. \end{aligned} \quad (5)$$

Для байесовской оценки

$$\mathbf{\Upsilon} = \sigma_z^2 \mathbf{R}_a^{-1}, \quad (6)$$

где $\mathbf{R}_a$ - ковариационная матрица $M \times M$ коэффициентов разложения.

$$\mathbf{R}_a = (\mathbf{B}^H \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^H \mathbf{R}_g \mathbf{B} (\mathbf{B}^H \mathbf{B})^{-1}. \quad (7)$$

Рассмотренный подход позволит получить лучшую производительность и точность оценки, но применим только в случае, если известны σ_z^2 и $\mathbf{R}_g$. В случае недостатка предварительной информации, может быть использован алгоритм максимального правдоподобия. Однако его использование ухудшит производительность оценки, вследствие чего снизится помехоустойчивость системы. Существует еще один вариант развития событий - оценка вероятности с упорядочением, для которой

$$\mathbf{\Upsilon} = \varepsilon \sigma_z^2 \mathbf{I}_M, \quad (8)$$

где $\mathbf{I}_M$ - единичная матрица $M \times M$, а ε - координирующий параметр с наилучшим значением σ_g^{-2} . Однако минус данной методики в том, что ее можно использовать только в случае, когда σ_z^2 и σ_g^2 известны в приемном тракте.

Вектор оценки коэффициента разложения задается формулой [3]

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{\Gamma} + \mathbf{\Upsilon})^{-1} \mathbf{W}_{\widehat{f_0 T_s}} \quad (9)$$

Результирующая оценка канала и сдвига частоты примет вид [3]

$$\hat{\mathbf{h}} = \mathbf{\Lambda}_{\widehat{f_0 T_s}} \mathbf{B} \hat{\mathbf{a}} \quad (10)$$

Современные приемники и проблема их реализации

Сложность реализации помехоустойчивых приемников QAM-сигнала в основном определяет сдвиг частоты при расчете $\mathbf{W}_{f T_s}$. Это можно сделать с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Однако для решения этой задачи необходим БПФ большой размерности $N_{\text{БПФ}} \gg N$, что не всегда реализуемо. Именно поэтому в работе используется более удобный метод, состоящий из двух этапов для поиска максимума в (4). Используется быстрое преобразование Фурье размера $N_{\text{БПФ}} \approx N$ при поиске с разрешением по частоте $\Delta f T_s = 1/N$. Затем нахождение подлинной оценки смещения частоты происходит с помощью дихотомического поиска небольшого числа итераций Q . Такой подход позволяет добиться высокой достоверности работы радиоприемника на широком диапазоне сбора данных и прост в реализации.

Принятый сигнал можно разделить на две части, соответствующие моментам пилотных сигналов и данных:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_p &= \mathbf{S}_p \mathbf{h}_p + \mathbf{z}_p, \\ \mathbf{r}_d &= \mathbf{S}_d \mathbf{h}_d + \mathbf{z}_d, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\mathbf{S}_p \mathbf{h}_p$ и $\mathbf{z}_p$ соответствуют моментам пилотного сигнала, а $\mathbf{S}_d \mathbf{h}_d$ и $\mathbf{z}_d$ соответствуют моментам информационных данных $\mathbf{S}, \mathbf{h}$ и $\mathbf{z}$. Процесс замирания изменяющегося во времени канала также можно разделить на две части, соответственно:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_p &= \mathbf{B}_p, \\ \mathbf{g}_d &= \mathbf{B}_d, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\mathbf{B}_p$ и $\mathbf{B}_d$ соответствуют моментам пилотного сигнала и данных для матрицы $\mathbf{B}$ соответственно.

Классические приемники могут использовать предложенную схему оценки, используя только пилотные символы для получения $\widehat{f_0 T_s}$ и $\hat{\mathbf{a}}$ в соответствии с (4) и (9), но с заменой $\mathbf{B}, \mathbf{S}, \mathbf{r}$.

Итеративные турбоприемники

Разработка итерационных турбоприемников необходима для увеличения эффективности обнаружения сигналов с QAM-модуляцией. Для повышения помехоустойчивости при

обнаружении сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией применяют совместную оценку смещения канала и частоты [4].

Алгоритм приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией на базе турбоприемника состоит из следующих основных действий. Сначала информационные данные кодируются в блоке турбокодера. Затем выходные биты поступают в перемежитель. После чего происходит отображение QAM. Пилотные символы находят место между каждым $T - 1$ символом данных с определенным периодом.

Функциональная схема итеративного приема на основе турбодекодера для QAM-модулированных сигналов представлена на рис. 1.

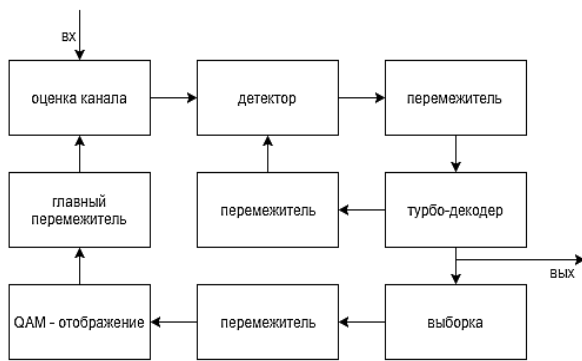


Рис. 1. Предлагаемая итеративная схема приема QAM-сигналов

Отличительная особенность предложенной методики приема QAM-сигналов заключается в том, что теперь оценка канала передается на усовершенствованный детектор, который позволяет повысить производительность оценщика, используя информацию логарифмического отношения мягкого решения (ОМР). Дополнительная статистическая информация ОМР генерируется на программном выходе турбодекодера в текущей итерации. Далее через детектор информация передается в турбоитерационный декодер, который генерирует начальные декодированные биты. В ОМР декодере данные преобразуются в двоичные биты. Затем начальные биты кодированных данных чередуются в перемежителе, отображаются в QAM-модуле [5], принимая символьные значения. Затем процесс повторяется так же, как в системе передачи информации. Основное отличие каждой следующей итерации заключается в том, что общая оценка канала теперь происходит на основе всех символов, что позволяет получить наиболее точ-

ные оценки, а затем передать в детектор, который, в свою очередь, генерирует апостериорное отношения правдоподобия [6]

$$\lambda_{b_k} = \ln \left[\frac{\sum_{s_d \in \mathcal{A}_k^+} e^{-\delta(s_d)} \prod_{i \neq k} p(b_i)}{\sum_{s_d \in \mathcal{A}_k^-} e^{-\delta(s_d)} \prod_{i \neq k} p(b_i)} \right], \quad (13)$$

где $p(b_i)$ является вероятностью принятого бита b_i и получена с использованием его априорного мягкого решения $L(b_i)$ как

$$p(b_i) = \frac{1}{2} \left[1 + b_i \tanh \left(\frac{1}{2} L(b_i) \right) \right]. \quad (14)$$

Из всего перечисленного можно сделать вывод, что применение детектора мягкого решения позволит снизить помехи, а вместе с ОМР-декодером уменьшить вероятность ошибки в декодированных битах. Для получения более высокой точности обнаружения и декодирования необходимо применить предложенную схему оценки в течение нескольких итераций.

По большому счету, в оценочных моделях можно использовать различные базисные функции: экспоненциальные, сфероидальные В-сплайны и др. [2]. Однако неприемлемость таких аппроксимаций обусловлена низкой чувствительностью к показателям статистических характеристик замирования канала связи. При этом предложенный вариант турбодекодера выигрывает в простоте реализации.

Моделирование

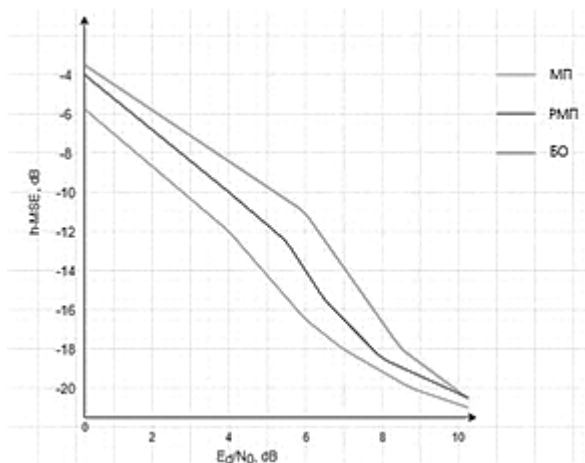
Рассмотрим систему с символьной программной модуляцией для передачи сигналов 16-QAM, с частотой $f_D T_s = 0,01$, при общем количестве символов $N = 514$, из которых $N_p = 28$ являются пилотами, а период перемежителя составляет $T = 19$ символов. Возьмем смещение частоты $f_0 T_s = 0,0123$ и широкий диапазон оценки частоты $\psi = 1$, где число дихотомических итераций составит $Q = 5$.

Критерием оценки эффективности предложенной методики выберем величину среднеквадратичной ошибки (СКО) частотного сдвига и оценки канала. Для каждого эксперимента в моделировании среднеквадратичные оценки соответственно рассчитываются как:

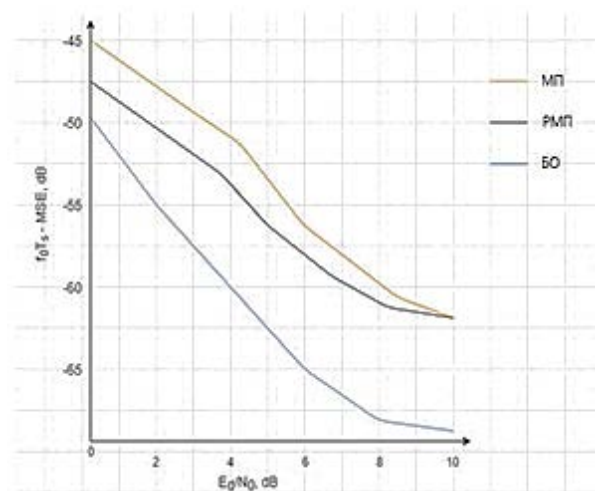
$$f_0 T_s - \text{СКО} = (f_0 T_s - \widehat{f_0 T_s})^2 \quad (15)$$

$$h - \text{СКО} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |h(nT_s) - \widehat{h(nT_s)}|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |h(nT_s)|^2} \quad (16)$$

Затем находится среднее от значений, полученных по всем испытаниям.

Рис. 2. Характеристики h – СКО

На рис. 2 представлены характеристики среднеквадратичной ошибки оценки канала от отношения сигнал/шум предложенных итерационных турбоприемников для сигналов 16-QAM. Используются критерии байесовской оценки (БО), максимума правдоподобия (МП) и вероятность регуляризованного максимума правдоподобия (РМП) в частотно-плоских изменяющихся во времени каналах замирания, кодируемых турбокодером 1/3 с полиномом генерации в восьмеричном виде и полученным после 4-й итерации.

Рис. 3. Характеристики f_0T_s -СКО

На рис. 3 представлены характеристики среднеквадратичной ошибки частотного сдвига от отношения сигнал/шум для предложенной итерационной методики турбоприема. Вид квадратурной модуляции сигналов - 16-QAM.

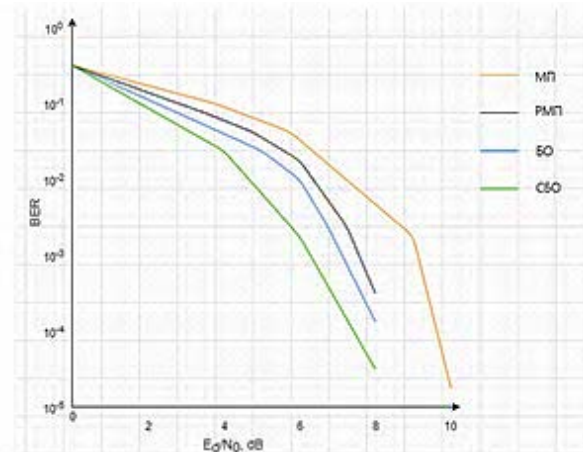


Рис. 4. Показатели BER

На рис. 4 представлены характеристики битовой ошибки от отношения сигнал/шум.

Заключение

Проанализировав графики, с легкостью можно сделать вывод, что интерполяция на основе скоростных битовых ошибок (СБО) с точки зрения BER и среднеквадратичной ошибок является наиболее эффективной, по сравнению с другими методами.

Минусом реализации данного способа является необходимость знать дополнительную статистическую информацию о канале радиосвязи – корреляцию частоты канала R и отношение сигнал/шум, что сильно усложняет расчет. При этом интерполяция по дискретному преобразованию Фурье в качестве дополнительной статистической информации использует лишь длину многолучевого канала, что дает преимущество в расчетах над СБО. Представленные графики наглядно показывают значительную положительную динамику производительности по сравнению с классическими приемниками.

Необходимо отметить, что производительность разработанной методики совместной оценки на основе скоростных битовых ошибок (СБО) можно приравнять к приемникам на основе идеального знания о канале, где сдвиг частоты считается известным. Также приведенный оценщик не уступает в помехоустойчивости тем приемникам, которые работают при малой погрешности канала.

Литература

1. Ylioinas J., Juntti M. Iterative joint detection, decoding, and channel estimation in turbo-coded MIMO-OFDM // IEEE Trans. Veh. Technol. 2009. Vol. 58. № 4. pp. 1784–1796/

2. Giannakis G.B., Tepedelenlioglu C. Basis expansion models and diversity techniques for blind identification and equalization of time-varying channels // *Proc. IEEE*. 1998. Vol. 86. № 10. pp. 1969–1986.

3. Khal R.N., Zakharov Y.V., Zhang J. Joint channel and frequency offset estimators for frequency-flat fast fading channels // in *Proc. 42nd Asilomar Conf. ACSSC'08*, Pacific Grove, California, USA, Oct. 2008, pp. 423–427.

4. Чирков О.Н., Свиридова И.В., Бобылкин И.С. Оптимизация оценки многолучевого канала радиосвязи с OFDM // *Труды международного симпозиума надеж-*

ность и качество. Пенза: Пензенский государственный университет, 2018. Т. 2. С. 131–133.

5. Чирков О.Н. Оценка пропускной способности высокоуровневых видов модуляции M-QAM // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т. 8. № 6. С. 12–13.

6. Чирков О.Н. Повышение помехоустойчивости высокоскоростной беспроводной системы обмена информации WI-FI // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. Т. 7. № 3. С. 66–67.

Поступила 07.06.2019; принята к публикации 29.07.2019

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>

Кузнецова Анастасия Олеговна - студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kuznecova070703@gmail.com

ITERATIVE TECHNIQUE OF INTERFERENCE-RESISTANT RECEPTION OF QAM-SIGNALS

O.N. Chirkov, A.O. Kuznetsova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article describes an iterative turbo receiver for time-varying fading channels, whose operation is based on an estimate of the channel offset and frequency, along with signal detection and data decoding. The paper analyzed the Bayesian maximum likelihood and regularized maximum likelihood estimates depending on the availability of various radio link static stats, as well as the simulation results showing the possibilities of further technology development. Different approaches for obtaining the highest performance were considered, the positive and negative sides of each of them were revealed, an improved algorithm of operation based on the turbo QAM modulation system was presented by increasing the number of interleavers. The joint channel estimate and QAM signal detection are based on the representation of the base decay time expansion model. A dichotomous search technique was used to track the frequency shift. The information generated in the turbo coder was used to increase the efficiency of the proposed technique in subsequent iterations. The simulation results showed that the models of noise-tolerant reception of QAM signals offered in this work have extremely high performance, while using less statistical information about the communication channel

Key words: receiver, iterative estimation, resulting estimate, channel, decoder

References

1. Ylioinas J., Juntti M. "Iterative joint detection, decoding, and turbo-coded MIMO-OFDM", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2009, vol. 58, no. 4, pp. 1784–1796

2. Giannakis G.B., Tepedelenlioglu C. "The basis of time-varying channels", *Proc. IEEE*, 1998, vol. 86, no. 10, pp. 1969–1986.

3. Khal R.N., Zakharov Y.V., Zhang J. "Joint channel and frequency offset/frequency in frequency-flat fast fading channels", *Proc. 42nd Asilomar Conf. ACSSC'08*, Pacific Grove, California, USA, Oct. 2008, pp. 423–427.

4. Chirkov O.N., Sviridov I.V., Bobylkin I.S. "Optimization of the evaluation of a multipath radiocommunication channel with OFDM", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma nadezhnost' i kachestvo)*, Penza State University, 2018, vol. 2, pp. 131–133.

5. Chirkov O.N. "Bandwidth estimation of high-level types of modulation M-QAM", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 6, pp. 12–13.

6. Chirkov O.N. "Improving the noise immunity of high-speed wireless information exchange system WI-FI", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 66–67.

Submitted 07.06.2019; revised 29.07.2019

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>

Anastasiya O. Kuznetsova, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kuznecova070703@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ СОВРЕМЕННЫХ ЛАМПОВЫХ УСТРОЙСТВ И АНАЛИЗ ИХ ЭФФЕКТИВНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ПЕРЕД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ

А.В. Башкиров, С.Е. Иванников, А.М. Колядина, А.С. Демихова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются тенденции развития современных ламповых электронных устройств в концепции их технических, технологических и экономических преимуществ перед полупроводниковыми электронными устройствами. Проводится анализ актуализации развития таких устройств в современной радиоэлектронике. Представлено сравнение критически важных показателей ламповых и полупроводниковых электронных станций (ЭС). Обзор и прогнозирование деградационных явлений в современных высокотехнологичных лампах. Это исследование включает информацию об истории и схемотехнике вакуумных ламп, теории проектирования усилителей и методах измерения звука, которые могут быть полезны для дальнейшей работы аудиоинженеров. В исследовании рассматриваются основные принципы усиления сигнала в низкочастотном диапазоне (звуковой частоты). Результатом исследования являются усилители на базе электровакуумных приборов, а также анализ будущих перспектив устройства. На основе открытых отечественных и зарубежных источников делается вывод о том, что современные электровакуумные приборы (радиолампы) обладают лучшими по сравнению с полупроводниковыми приборами характеристиками, а именно: они малошумящие, устойчивы к радиации. Однако и обладают существенным недостатком, а именно: малым сроком службы по сравнению с полупроводниковыми устройствами

Ключевые слова: современные высокотехнологичные ламповые компоненты, ламповые усилители, деградационные процессы в радиолампах

Введение

В работе рассматриваются области применения современных радиоламп, причины их применения вместо полупроводников, проведено сравнение основных преимуществ радиоламп и транзисторов. Рассмотрены дальнейшие возможности развития и применения радиоламп, причины их малой распространенности в бытовой сфере. Разобраны принципы работы лампового триода и проведено его сравнение с полевым и биполярным транзистором.

В статье также приведены основные способы уменьшения деградационных процессов в современных вакуумных радиолампах, рассмотрены способы продления срока службы ламп и оценена рациональность использования на фоне с полупроводниками.

С появлением и распространением транзистора и других полупроводниковых элементов, областей в которых востребованы радиолампы, стало меньше. Полупроводники смогли заменить лампы в подавляющем количестве бытовых электроприборов. Сейчас радиолампы используются в узких областях, где применение полупроводников невозможно либо не-

рационально. Существуют отрасли, в которых вакуумным радиолампам сложно найти равносильную замену.

Области применения современных радиоламп

Радиолампы хорошо зарекомендовали себя на больших радиостанциях, особенно для уровней мощности выше 10000 Вт и частот выше 50 МГц. На высоких частотах транзисторы менее эффективны и более дорогие. Для создания мощного твердотельного передатчика необходимы сотни силовых транзисторов с большими теплоотводами, в то время как радиолампам достаточно воздушного либо водного охлаждения.

В диапазонах сверхвысоких частот радиолампы широко распространены. Большинство коммерческих спутников связи используют лампы в своих «нисходящих» усилителях мощности. В «восходящей линии связи» наземных станций также используются радиолампы. А для получения высокой выходной мощности, конкуренции радиолампам нет.

Большинство профессиональных музыкантов отдаёт предпочтение ламповым усилителям. Для них усилитель и динамик являются частью музыкального инструмента. Своеобразное искажение и затухание динамики ха-

рактеристики луча тетрода или пентодного усилителя с выходным трансформатором для соответствия нагрузке громкоговорителя уникально у радиоламп и трудно имитируется в твердотельных устройствах.

Современные электровакуумные приборы значительно устойчивее к воздействию радиоактивного излучения и электромагнитных импульсов, нежели полупроводниковые приборы. В связи с этим и в современной военной технике радиолампы нашли широкое применение, особенно в радиоустройствах, которые должны сохранить боеспособность после близких взрывов ядерных бомб. А устойчивость к большому диапазону температур и радиационному фону сделала радиолампы востребованными в космической области.

Принцип работы радиоламп

Работа радиолампы основана на потоках электронов между анодом и катодом. Источником электронов внутри радиолампы является катод, нагретый до температуры от 800 до 2000° С. Под действием термоэлектронной эмиссии из катода испускаются электроны и создают вокруг него «облако». От уровня накала зависит количество и плотность электронов вблизи катода. Помимо нагрева для свободного высвобождения электронов необходимо отсутствие воздуха, молекулы которого способны поглощать свободные электроны [1].

При подаче на анод положительного напряжения к нему от катода начинают идти свободные электроны, при отрицательном напряжении на аноде и положительном на катоде перемещение электронов не происходит. На этом принципе основана работа лампового диода.

Работа триода основана на управлении данным потоком электронов. Для чего вводится управляющая сетка (проволочная спираль между катодом и анодом). Подачей малого отрицательного напряжения уменьшается количество проходящих электронов, а сила анодного тока при этом уменьшается. При высоком отрицательном напряжении сетка становится барьером для электронов, а их перемещение ограничивается объёмом между катодом и сеткой. Положительное напряжение на сетке увеличивает анодный ток. Подавая различное напряжение на сетку, осуществляется управление силой анодного тока радиолампы.

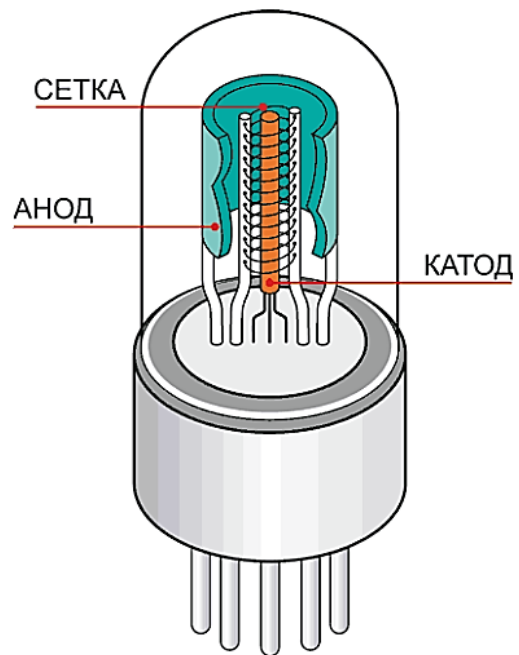


Рис. 1. Принципиальное внутреннее устройство лампового триода

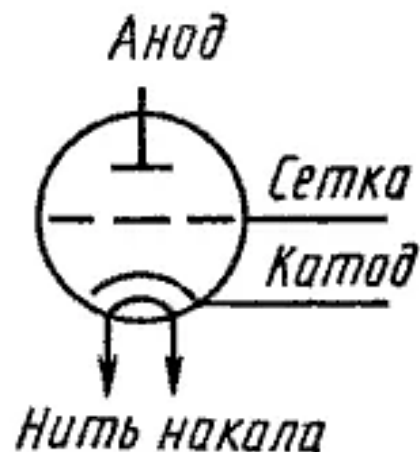


Рис. 2. Обозначение триода на принципиальных электрических схемах

Основным минусом радиоламп по-прежнему остаётся необходимость нагрева катода. Накал осуществляется меньшим напряжением, как правило это 6,3 В, это ограничение усложняет силовой трансформатор. Устройства на базе радиоламп становятся более габаритными. Отсутствие накала в полупроводниковых транзисторах и питание их от меньших напряжений дало им преимущество в областях носимых и компактных устройств.

Сравнение радиоламп с полевым и биполярным транзистором

Транзисторы намного надежнее ламп и меньше ламп по габаритам. У них нет нити накаливания, потребляющей дополнительную энергию и рано или поздно сгорающей. Конечно, у мощных транзисторов возникает проблема отвода тепла. Она решается размещени-

ем их в корпуса больших размеров, у которых предусмотрены элементы крепления их теплоотводящие радиаторы. Транзисторы больше, чем лампы, подвержены электрическому пробоем при превышении рабочих напряжений [2].

С основными различиями между лампами и транзисторами можно ознакомиться в таблице.

Основные различия между радиолампой, полевым и биполярным транзисторами

Различия	Элемент усиления		
	Биполярный транзистор	Полевой транзистор	Электрорадиотрубка (триод)
Тип электрической проводимости	Проводимость в зависимости от типа транзистора электронная или дырочная (NPN или PNP)	В зависимости от технологии изготовления (кремний-оксид-полупроводник) электронная или дырочная	Только электронная проводимость в вакууме, не зависимо от типа устройства
Нелинейность усиливаемого сигнала на входе	При усилении высоких частот нелинейность обусловлена емкостной зависимостью от напряжения. На низких частотах - нелинейностью вольтамперных характеристик «база- эмиттер»	На высоких частотах нелинейность вызвана паразитной емкостью «сток-затвор» от уровня подаваемого напряжения. На низких частотах полностью отсутствует	Полностью отсутствует
Нелинейность усиливаемого сигнала на выходе	Прямо пропорциональна коллекторному току	Прямо пропорциональна силе тока стока	Пропорциональна величине тока анода
Чувствительность прибора к перегреву	Прибор очень чувствителен к мгновенному перегреву р-п перехода прибора	Прибор очень чувствителен к мгновенному перегреву р-п перехода прибора	Полностью отсутствуют
Сопротивление на выходе усилителя	Значительно больше, чем сопротивление подключаемой нагрузки	Значительно больше сопротивления подключаемой нагрузки	В два раза меньше, чем сопротивление подключаемой нагрузки

Механическая прочность ламп

Стеклоколба радиоламп имеет малую механическую прочность. Повреждение колбы ведёт к нарушению вакуума, что неминуемо приводит к выходу из строя радиолампы в целом. При разработке устройств на базе ламп необходимо учитывать их прочность. При построении аналитических и эксплуатационных характеристик механической прочности и надежности радиоэлектронной системы вследствие воздействия ударных нагрузок, вибраций, линейных и нелинейных ускорений, которые возникают, например в авиационной

аппаратуре, накапливается информация. К этой информации относятся данные об используемой элементной базе, печатной платы и методах ее изготовления, материале и технологии изготовления корпусных деталей и шасси радиоэлектронной техники. После проведенного анализа и расчетов можно прогнозировать наиболее слабые участки конструкции, которые будут испытывать сильные механические напряжения. Такие участки необходимо либо разгружать, либо усиливать конструкцию [3].

Графический метод исследования усилительных каскадов на лампах

Широко применяемый графический метод исследования позволяет наглядно для проектировщика представить принцип работы будущего радиоэлектронного изделия, подобрать для него оптимальный режим работы, рассчитать параметры для нормальной работы усилительного каскада, требуемую фильтрацию шумов и их источники, определиться со всеми расчетными параметрами [4].

На рис. 3 приведен пример графика необходимого для определения параметров усилителя (I_{a0} , $I_{a\text{макс}}$, $I_{a\text{мин}}$, $I_{a\text{с}}$; U_{a0} , $U_{a\text{макс}}$, $I_{a\text{мин}}$, $U_{a\text{с}}$, $K = U_{a\text{с}} / U_{m\text{вх}}$, η_3 и η_n).

$$K = -\frac{\mu Ra}{Ra + Ri}$$

Используя формулу, можно определить коэффициент усиления каскада.

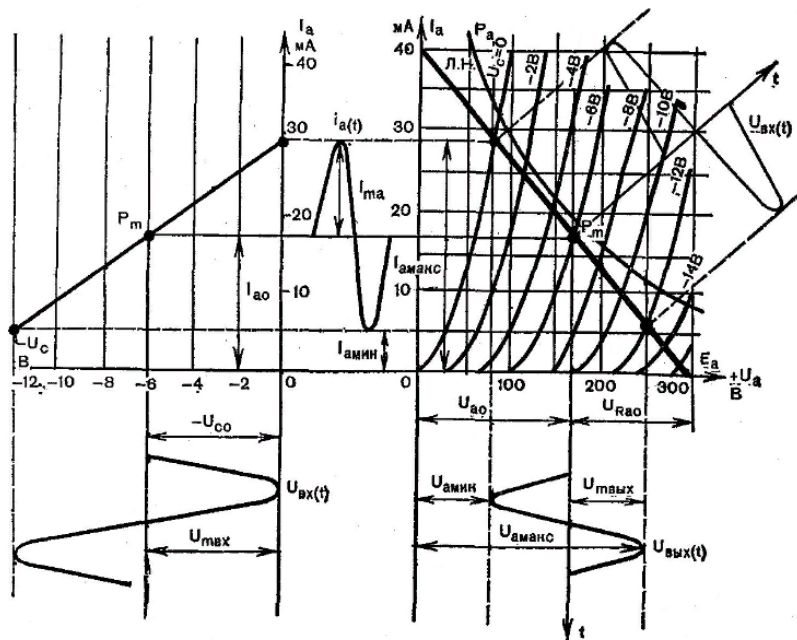


Рис. 3. График для анализа работы усилительного каскада на триоде

Современные разработки

В наше время активно идут разработки в области микроминиатюризации. У полупроводников в этой области возникла проблема масштабирования, связано это с повышением производительности микросхем без увеличения тактовой частоты. В то время как мировые производители в области микропроцессоров продолжают искать долгосрочное решение этой проблемы, ни одна известная технология следующего поколения, как ожидается, не перезапустит масштабирование кремния и не позволит вернуться к традиционному увеличению одного из главных параметров усилителя, а именно тактовой частоты.

Ученые из крупного научного центра Калифорнийского технологического института сделали вывод о том, что у них решением этой проблемы послужит возвращение к очень старой технологии. Вакуумные трубки, согласно

доктору Акселю Шереру, могут быть ключом к повышению производительности транзистора и снижению энергопотребления. Считается, что удастся получить структуры размером порядка 6-8 Нм. Одна из проблем современных процессоров заключается в том, что процессоры страдают от значительных объёмов утечки электроэнергии – конструкции Шерера будут использовать ток утечки для переключения состояния, тем самым повышая эффективность и общую производительность [5].

У данного решения также есть ряд минусов, связанных с необходимостью переоборудовать производство под новый продукт, обеспечением выпуска нужного количества в год. Также неизвестно, могут ли конструкции Шерера быть построены достаточно быстро, чтобы поддерживать текущие темпы производства, и как они будут интегрированы в современные производственные линии. Эти вопросы могут показаться скучными по сравнению с

фундаментальным обещанием технологии, но это то, что в итоге определит появление технологии на рынке.

Миниатюрные вакуумные трубки могут превратиться в основной драйвер производительности ПК, особенно если они могут быть изготовлены в масштабе, но стоимость и производственные проблемы являются огромным препятствием для любой другой технологии, утверждающей себя в качестве конкурента кремнию. К аналогам проверенной технологии зачастую относятся скептически и продолжают развитие текущих технологий большей ценой.

К тому же развитие полупроводниковых технологий не стоит на месте, отсутствие значительного роста обусловлено тем, что кремний не является самым быстрым полупроводником. Производство процессоров на другой полупроводниковой базе даст возможность создать более быстрые чипы, но экономически они будут не выгодны.

Заключение

Радиолампы – это относительно надежные компоненты, но они являются одной из основных причин отказа любого электронного устройства, использующего радиолампы. Большинство отказов радиоламп связано с их конструктивным несовершенством. Утечка инертного газа через уплотнение – основной деградационный процесс в стеклянных радиолампах, поскольку пористые аноды и несовершенные уплотнения типа «стекло-металл» позволяют мельчайшим количествам газа проникать в вакуум.

Из статьи можно сделать ряд рекомендаций, которые позволят замедлить деградационные процессы в современных радиолампах и увеличить срок службы таких устройств.

Чтобы обеспечить максимальный срок службы радиоламп с использованием торированных вольфрамовых трубок, следите за рабочей температурой корпуса радиоламп: не

превышайте заданные значения; избегайте длительных периодов чрезмерного перегрева анода или сетки; избегайте длительных периодов простоя; избегайте уровня напряжения накала выше рекомендуемого производителем; не подвергайте радиолампы ударам или вибрации; используйте надежную схему ограничения тока на аноде.

Чтобы обеспечить максимальный срок службы радиоламп с использованием металлооксидных катодных трубок, следите за рабочей температурой корпуса радиоламп: не превышайте заданные значения; избегайте длительных периодов чрезмерного тока на аноде; избегайте даже очень коротких периодов чрезмерного рассеяния сетки, включая быструю электронную схему аварийного отключения сетки; избегайте уровня напряжения накала выше рекомендуемого производителем; всегда дожидайтесь полного прогрева, прежде чем подавать ток на катод; никогда не применяйте чрезмерно высокое напряжение, так как это может привести к перегоранию катода; не подвергайте радиолампу ударам или вибрации; используйте надежную схему ограничения тока на аноде.

Литература

1. Как работает радиолампа. Режим доступа: <http://zvukomaniya.ru/kak-rabotaet-radiolampa/>
2. Отличия транзисторов от ламп. Режим доступа: <http://audioakustika.ru/otl>
3. Турецкий А.В. Оптимальное проектирование радиоэлектронных модулей с учетом механических воздействий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 5. С. 75-79.
4. Графоаналитический метод исследования усилительных каскадов. Режим доступа: <http://www.radiolamp.ru/teoria/raschet-unch/3.shtml>
5. Могут ли современные наноразмерные трубки заменить транзисторы? Режим доступа: <https://www.extremetech.com/computing/229680-could-modern-nanoscale-vacuum-tubes-replace-transistors>
6. Современные сферы применения радиоламп. Режим доступа: <https://vevby.ru/articles/16008-sovremennyye-sfery-primeneniya-radiolamp.html>

Поступила 10.06.2019; принята к публикации 05.08.2019

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fab7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Иванников Сергей Евгеньевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: serega.ivanikow@yandex.ru

Колядина Анастасия Михайловна – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kolyadina.2018@mail.ru

Демихова Алеся Сергеевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: mataxari_ya@mail.ru

FORECASTING DEGRADATION PROCESSES OF MODERN TUBE DEVICES AND ANALYSIS OF THEIR EFFECTIVE ADVANTAGES OVER SEMI-CONDUCTORS

A.V. Bashkirov, S.E. Ivannikov, A.M. Kolyadina, A.S. Demikhova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the development trends of modern tube electronic devices in the concept of their technical, technological and economic advantages over semiconductor electronic devices. The analysis of the actualization of the development of such devices in modern electronics is carried out. The article gives the comparison of critical indicators of tube and semiconductor electronic stations, the review and prediction of degradation phenomena in modern high-tech lamps. This study includes information on the history and circuit design of vacuum tubes, the theory of amplifier design and sound measurement methods that may be useful for further work of audio engineers. The study examines the basic principles of signal amplification in the low-frequency range (sound frequency). The results of the study give amplifiers based on electrovacuum devices, as well as an analysis of the future prospects of the device. On the basis of open domestic and foreign sources, it is concluded that modern electrovacuum devices (radio tubes) have the best characteristics in comparison with semiconductor devices, namely, they have low noise and are resistant to radiation. However, they have a significant drawback, namely, a short service life compared to semiconductor devices.

Key words: modern high-tech tube components, tube amplifiers, degradation processes in radio tubes

References

1. "How the radio tube works" ("Kak rabotayet radiolampa"), available at: <http://zvukomaniya.ru/kak-rabotaet-radiolampa/>
2. "Differences between transistors and tubes" ("Otlichiya tranzistorov ot lamp"), available at: <http://audioakustika.ru/otl>
3. Turkish A.V. "Optimal design of radio-electronic modules, taking into account mechanical effects", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 5, pp. 75-79.
4. "Graphic and analytical method for studying amplifying cascades" ("Grafoanaliticheskiy metod issledovaniya usili-tel'nykh kaskadov"), available at: <http://www.radiolamp.ru/teoria/raschet-unch/3.shtml>
5. "Can modern nanoscale tubes replace transistors?" ("Mogut li sovremennye nanorazmernyye trubki zamenit' tranzistory?"), available at: <https://www.extremetech.com/computing/229680-could-modern-nanoscale-vacuum-tubes-replace-transistors>.
6. "Modern applications of radio tubes" ("Sovremennyye sfery primeneniya radiolamp"), available at: <https://vevby.ru/articles/16008-sovremennyye-sfery-primeneniya-radiolamp.html>

Submitted 10.06.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: fab7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Sergey E. Ivannikov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: serega.ivannikov@yandex.ru

Anastasiya M. Kolyadina, student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: kolyadina.2018@mail.ru

Alesya S. Demikhova, student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: mataxari_ya@mail.ru

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.4.015

УДК 621.454.2

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ МНОГОРАЗОВОГО ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.Ф. Ефимочкин, А.А. Пономарев, М.А. Любинецкий

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в ходе работы для вновь разрабатываемых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) многоразового использования определены два основных метода технической эксплуатации – это техническая эксплуатация по ресурсу (ТЭР) и техническая эксплуатация по состоянию (ТЭС). Формирование состава работ по контролю технического состояния (КТС) двигателя определяется уже на этапе опытно-конструкторской работы (ОКР) и постепенно сокращается до минимального уровня к моменту завершения ОКР. К моменту передачи двигателя в эксплуатацию перечень операций по КТС должен быть оптимальным и соответствовать критерию минимальной стоимости. Изложен перечень типичных работ, выполняемых при КТС на двигателе в межполетный период. Также приведены структура системы диагностирования двигателя и принципиальная схема межпускового диагностирования. В целях сокращения стоимости и своевременного определения технического состояния ЖРД составлена методика проведения функциональной диагностики ЖРД. Она основывается традиционно на выполнении инженерного анализа телеметрической информации и на использовании компьютерных диагностических программ в автоматическом режиме. Разработан алгоритм обнаружения неисправности двигателя с использованием анализа показателей бортовой аппаратуры двигателя. Приведен пример определения наличия неисправности в ЖРД с помощью данного алгоритма. Представлена оптимальная технология диагностирования ЖРД

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, диагностика, контроль технического состояния, функциональная диагностика, компьютерная диагностика

Введение

Одним из основных требований, предъявляемых к ЖРД многоразового использования является требование безопасной эксплуатации при минимальном уровне затрат на техническое обслуживание. Выполнение данного требования обеспечивается, с одной стороны, совершенствованием конструкции двигателя (высокой степенью отработанности) и, с другой стороны, оптимальным составом и технологией работ между очередными применениями (испытаниями) двигателя.

Определение состава работ, проводимых при техническом обслуживании

Состав работ, проводимых на двигателе при техническом обслуживании между испытаниями, принципиально зависит от принятого метода эксплуатации. Для вновь разрабатываемых метановых ЖРД планируется, как правило, использование метода технической эксплуатации по ресурсу (ТЭР) с последующим переходом на техническую эксплуатацию по состоя-

нию (ТЭС). При этом предполагается, что двигатель в процессе его создания будет отработан до такой степени, при которой не потребуются в течение назначенного срока эксплуатации (10 лет при 25-кратном использовании) ремонт для восстановления ресурса. На двигателе будут проводиться только операции по поддержанию его работоспособности и исправности [1].

Так как многоразовый ЖРД конструктивно выполняется разъемным, то на нем, в принципе, возможно проведение текущего ремонта, состоящего в замене или восстановлении отдельных частей, в том числе без демонтажа двигателя из отсека РН. Проведение такого ремонта, если это не предусмотрено эксплуатационной документацией, должно санкционироваться в каждом конкретном случае специальным решением разработчика и изготовителя двигателя, согласованным с разработчиком РН и эксплуатирующей организацией. Ремонт двигателя, таким образом, не будет являться предметом планирования поставок запасных частей, разработки ремонтной документации и организации ремонтной базы на космодроме [2].

Виды и состав работ по техническому обслуживанию двигателя между испытаниями будут формироваться уже в процессе ОКР на

основе концепции, предполагающей максимальный набор контрольных операций по мониторингу технического состояния двигателя в начале экспериментальной отработки с постепенным сокращением этого набора и доведением его до минимального уровня к моменту завершения ОКР.

Таким образом, к моменту передачи двигателя в эксплуатацию по методу ТЭР состав работ при техническом межполетном обслуживании будет оптимизирован и будет соответствовать критерию минимальной стоимости.

При переходе к эксплуатации по методу ТЭС потребуются расширение номенклатуры работ по техническому обслуживанию двигателя, что обусловлено необходимостью более углубленного мониторинга технического состояния двигателя, находящегося за пределами первоначального назначенного ресурса.

Объем указанной расширенной номенклатуры работ будет устанавливаться в каждом конкретном случае с учетом накопленного опыта эксплуатации данного двигателя, резуль-

татов дополнительных работ по дефектации двигателей, снятых с эксплуатации, и анализа последствий отказов, возможных при продолжении эксплуатации двигателя до предельного состояния [3].

Ниже изложены краткие сведения по типовым работам на двигателе в межполетный период:

- контроль работоспособности по рабочим параметрам, зарегистрированным на последнем использовании (функциональная диагностика) [4];
- визуальный контроль материальной части (внешний и внутренний);
- контроль герметичности;
- тестовые проверки отдельных агрегатов, аппаратуры и датчиков.

Конкретный перечень операций по каждому виду работ должен динамично изменяться по мере отработки двигателя, набора статистических данных по неисправностям или отказам в процессе эксплуатации.



Рис. 1. Структура системы диагностирования двигателя

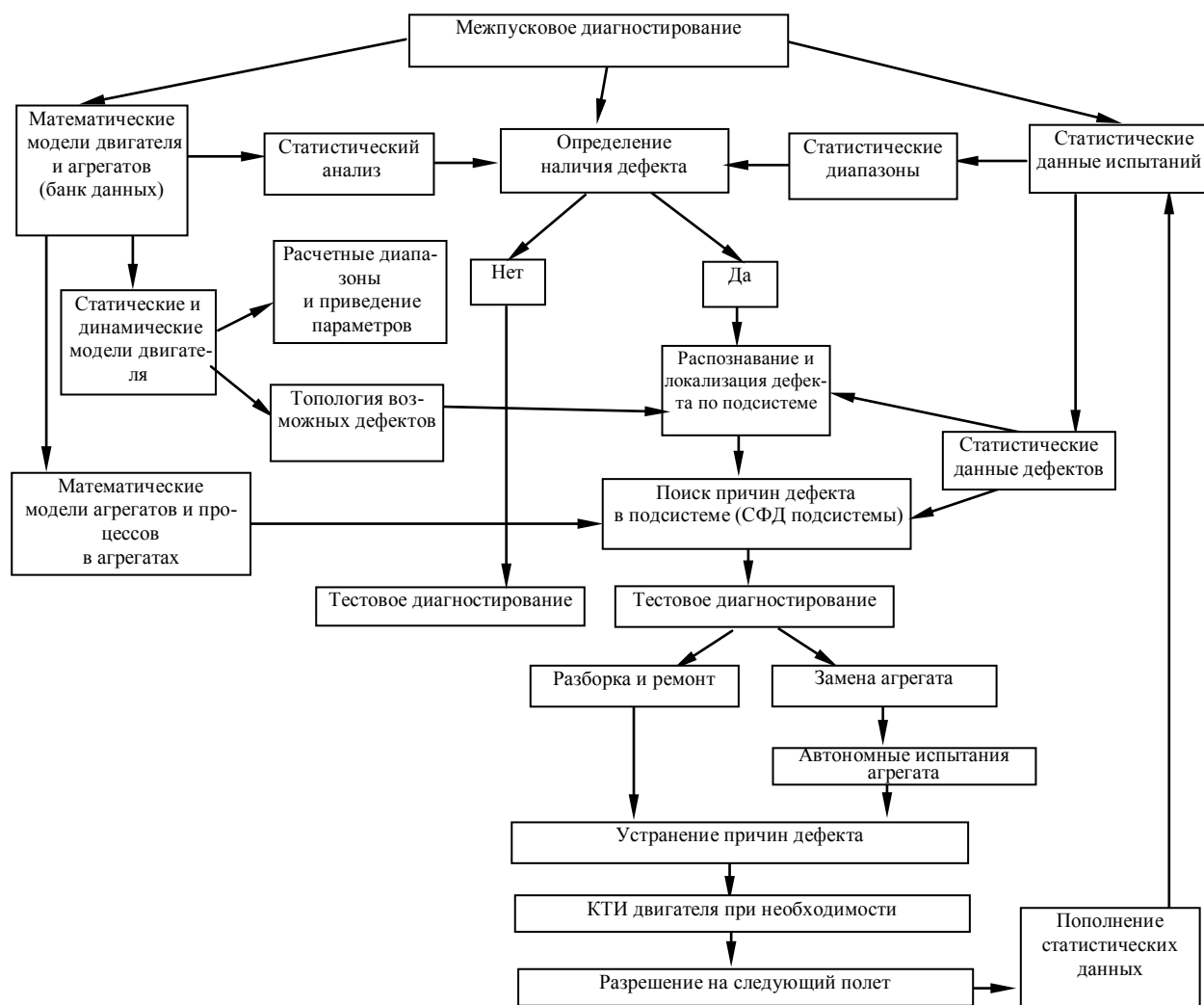


Рис. 2. Принципиальная схема МПД

Результаты межпусковой диагностики (МПД) формируются из результатов контроля работоспособности двигателя по рабочим параметрам, зарегистрированным при последнем пуске, и результатов контроля технического состояния (КТС) двигателя, полученных при внешнем контроле и тестовых проверках в процессе технического обслуживания двигателя [5].

Структура и принципиальная схема этих работ приведены на рис. 1 и 2.

Функциональная диагностика

Контроль функционирования двигателя по рабочим параметрам может проводиться как на основе традиционно выполняемого инженерного анализа телеметрической информации, так и на основе использования компьютерных диагностических программ в автоматическом режиме. Последняя может выполняться также в

режиме реального (квазиреального) времени бортовой аппаратурой двигателя. Простейший алгоритм обнаружения неисправности двигателя в случае использования бортовой, как это предложено в [6], может выглядеть следующим образом:

- по всем контролируемым параметрам в течение всего времени работы двигателя регистрируется разность

$$\nabla_i = X_i - Y_i, \quad (1)$$

где X_i - значение параметра, регистрируемое системой измерения;

Y_i - расчетное значение параметра в предположении исправности двигателя (расчет обновляется на каждом такте измерения в соответствии с изменившимися значениями внешних факторов – давлений в баках, температуры топлива на входе в двигатель, углов поворота валов регулятора и дросселя).

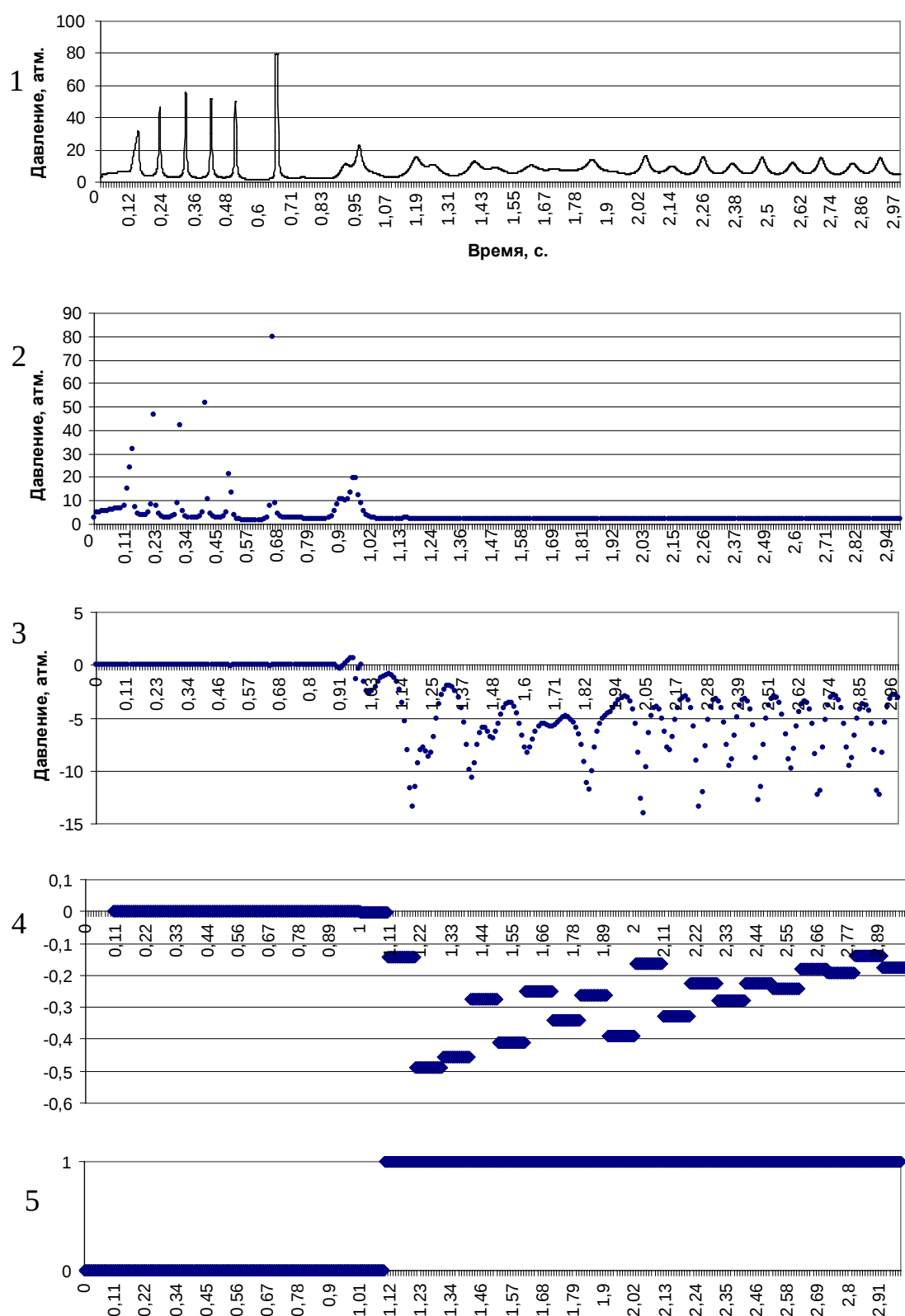


Рис. 3. Компьютерная функциональная диагностика двигателя в режиме квазиреального времени по параметру «давление на входе в насос»

Вместо расчетного значения может использоваться статистическое значение параметра;

- сравниваются зарегистрированные разности ∇i с пороговыми уровнями $\nabla^* i$, задаваемыми с учетом погрешностей измерения и расчета.

Если $\nabla i > \nabla^* i$, то ∇i присваивается код "1", если условие не выполняется – присваивается код "0";

- суммируются все коды по всем контролируемым параметрам.

Если $\sum \nabla i > 0$, то фиксируется факт наличия неисправности.

В качестве примера на рис. 3 графически представлены результаты численного эксперимента по отработке элементов компьютерной диагностики гипотетического двигателя, выполненного по схеме с дожиганием окислительного газа, на режимах запуска и стационарной работы. Для усложнения эксперимента были выбраны условия работы двигателя, способствующие возникновению развитых пульсационных явлений, обусловленных кавитацией, как на переходном режиме запуска, так и на основном режиме. По условию эксперимента в конце переходного режима запуска (на времени 0,99 с) возникала неисправность в виде засорения входного фильтра окислителя [7]. Задачей данного фрагмента работы являлось определение диагностических признаков неисправности по основным функциональным параметрам двигателя: скорости вращения ротора ТНА, давлению на входе и выходе насосов, температуре газов перед турбиной и т. д. Как видно из рис. 3, эта задача решается – диагностические признаки удается сформировать, несмотря на нестационарный характер протекания рабочего процесса в двигателе. На рис. 3 в качестве примера приведены графики 1-5, которые демонстрируют следующее:

- расчетное изменение параметра при запуске в предположении исправного состояния двигателя (график 1);

- расчетное изменение параметра при неисправности, возникшей на 0,99 с (при частоте опроса системы измерения 100 Гц) (график 2);

- разность параметров неисправного и исправного двигателя (где двигатель исправен до 0,99 с, разница отсутствует или минимальна, с появлением неисправности увеличивается разница между расчетными параметрами исправного и действительными показаниями параметров неисправного двигателей) (график 3);

- среднеинтегральное значение разности параметров неисправного и исправного двигателя на диагностических интервалах длительностью 0,1 с (график 4);

- код диагностического признака ("0" – отсутствие неисправностей и "1" – наличие неисправности) по одному из разрядов рассматриваемого параметра-признака (график 5).

Визуальный анализ графиков на рис. 3 выявил следующее: засорения входного фильтра окислителя стало причиной падения давления на входе в насос (рис. 3 график 2). В результате падения давления и, как следствие, снижения сопротивления жидкости в насосе окислителя, а также в целях поддержания требуемого давления на выходе из насоса, началось увеличение оборотов ротора ТНА. Следствием всего вышеперечисленного стало падение давления на выходе из насоса, несмотря на рост оборотов ротора ТНА. Таким образом, забившийся фильтр приведет к неконтролируемому росту оборотов ротора ТНА и возникновению кавитации в насосе, что повлечет за собой разрушение ТНА. Если система управления своевременно не выполнит аварийное выключение ЖРД – это может привести к катастрофе ракеты-носителя.

Во избежание подобного развития событий выработан следующий алгоритм поиска адреса неисправности:

- все коды контролируемых параметров на каждом расчетном такте обновляются в таблице входных данных компьютерной программы диагностики. При этом может происходить в зависимости от конкретного вида компьютерной программы перекодировка признаков неисправности (в том числе и их разветвление с учетом разряда признака, задаваемого, например, по количественному или иному принципу);

- рассчитываются апостериорные вероятности для всех предусмотренных диагностической матрицей неисправностей. Расчет ведется по формуле

$$P(Di/K^*) = P(Di) \cdot P(K^*/Di) / P(K^*); \quad (2)$$

- сравнивается максимальное значение апостериорной вероятности с пороговым уровнем P_v . Если

$$P(Di/K^*) > P_v, \quad (3)$$

то локальный адрес неисправности установлен;

- из диагностической матрицы извлекается и фиксируется наименование неисправности, имеющей максимальное значение апостериорной вероятности;

- ранжируется весь список возможных неисправностей в порядке убывания апостериорных вероятностей. Ранжированный список используется, если не преодолен диагностический порог на предыдущем шаге диагностирования.

В числе диагностических признаков могут быть, кроме функциональных параметров двигателя, другие показатели, например: "наличие (или отсутствие) замечаний на предыдущем включении", "значение остаточного ресурса", "неисправность, выявленная при тестовом диагностировании" и т. д. [8].

Также есть способы, позволяющие в процессе проведения контроля технического состояния двигателя во время его функционирования определять степень его работоспособности. При отклонениях в показаниях параметров происходит оценка системой серьезности неисправности, и она определяет возможность закончить испытание или работу по полетному заданию ЖРД. При незначительных отклонениях параметров от нормы, не влияющих на работу двигателя, команда на останов не подается. Данный анализ производится на протяжении всего времени работы двигателя [9].

Выводы

Для вновь проектируемого двигателя требуется разработать технологию, позволяющую исключить затрачиваемое на функциональную диагностику время из общего времени межполетного обслуживания двигателя. Компьютерная функциональная диагностика двигателя в режиме квазиреального времени позволяет контролировать состояние двигателя и его агрегатов во время полета и получать информацию о возможных неисправностях, давая тем самым возможность принять своевременные меры для исключения аварийного выключения ЖРД. Описанный выше способ диагностики также дает возможность сократить затраты времени и ресурсов на проведение контроля

технического состояния ЖРД в межполетный период. Именно поэтому наиболее эффективной представляется автоматическая (компьютерная) диагностика непосредственно на борту летательного аппарата во время его активного полета и возврата на базу технической подготовки полетов.

Литература

1. Подтверждение концепции многофазового жидкостного ракетного двигателя на компонентах топлива сжиженный природный газ и кислород / И.И. Белоусов, В.М. Фомин, В.В. Голубятник, Д.В. Солдатов, А.В. Елисе-ев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 4. С. 42-45.
2. Торгашин А.С., Бегишев А.М., Ерисов А.А. Перспективные разработки ЖРД многофазового использования // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т.1. С. 214-216.
3. Солнцев В.Л., Радугин И.С., Задеба В.А. Основные требования к маршевым двигателям перспективных ракет-носителей сверхтяжелого класса с жидкостными ракетными двигателями // Космическая техника и технологии. 2015. № 2 (9). С. 25-38.
4. Хахулин А.А. Повышение эффективности контроля, диагностики и управления ЖРД // Датчики и системы. 2008. № 7. С. 40-44.
5. Исаев В.Г., Озерский М.Д. Основные направления создания отечественных многофазовых космических систем // Информационно-технологический вестник. 2014. № 1. С. 34-43.
6. Ефимочкин А.Ф. Численный эксперимент по отработке элементов компьютерной диагностики ЖРД // Ракетно-космическая техника и технология. 2009. С. 123-124.
7. Ягодников Д.А., Чертков К.О., Антонов В.Ю. Численное исследование рабочего процесса в восстановительном газогенераторе кислород-метанового ЖРД разгонного блока // Аэрокосмический научный журнал. 2015. № 5. С. 12-25.
8. Мартиросов Д.С., Коломенцев А.И. Функциональная диагностика ЖРД в режиме реального времени // Авиационно-космическая техника и технология. 2012. № 7 (94). С. 197-200.
9. Пат. 247850 Российская Федерация. МПК G01M15/14 (2006.01). Способ контроля и диагностирования ракетного двигателя / Васин А.С., Венгерский Э.В., Усов Г.Л., Ермолов М.И., Рябых В.Ю., Кучкин В.Н. № 2011148474/06; заявл. 30.11.2011; опубл. 27.02.2013.

Поступила 30.06.2019; принята к публикации 05.08.2019

Информация об авторах

Ефимочкин Александр Фролович - д-р техн. наук, профессор кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8 (473) 262-97-74

Пономарев Алексей Александрович – аспирант кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: xaxol_san@mail.ru, тел. 8-920-432-41-01

Любинецкий Максим Андреевич – аспирант кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: norm_mail@mail.ru, тел. 8-952-544-87-68

BASIC PRINCIPLES OF BUILDING, MAINTENANCE SERVICE AND DIAGNOSTICS OF REUSABLE LIQUID ROCKET ENGINE OF SPACE APPLICATION

A.F. Efimochkin, A.A. Ponomarev, M.A. Lyubinetskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in the course of work for the newly developed reusable LPRE, two main methods of technical operation were identified – technical exploitation of the resource and exploitation of the state. Formation of the scope of work on the control of the technical condition of the engine is determined at the stage of experimental construction work and is gradually reduced to a minimum level by the time the experimental construction work is completed. By the time the engine is put into operation, the list of operations on the control of the technical condition should be optimal and meet the minimum cost criterion. A list of typical work performed at the technical condition control on the engine in the interflight period is made. The structure of the engine diagnostics system and a schematic diagram of inter-trigger diagnostics are also given. In order to reduce the cost and timely determine the technical condition of the LPRE, a method for conducting functional diagnostics of LPRE based on the traditionally performed engineering analysis of telemetric information and based on the use of computer diagnostic programs in an automatic mode was compiled. An algorithm for detecting engine malfunction in the case of using the onboard equipment of the engine was developed. An example of determining the presence of a malfunction in the LPRE using this algorithm is given. The optimal technology for diagnosing LPRE was determined

Key words: liquid-propellant rocket engine, diagnostics, technical condition monitoring, functional diagnostics, computer diagnostics

References

1. Belousov I.I., Fomin V.M., Golubyatnik V.V., Soldatov D.V., Eliseev A.V. "Confirmation of the concept of a reusable liquid-propellant rocket engine on components of a fuel liquefied natural gas and oxygen", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 42-45
2. Torgashin A.S., Begishev A.M., Erisov A.A. "Perspective development of reusable LPRE", *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics (Aktual'nye problem aviatsii i kosmonavtiki)*, 2016, vol.1, pp. 214-216.
3. Solntsev V.L., Radugin I.S., Zadeba V.A. "Basic requirements for propulsion engines of promising super heavy-class launch vehicles with liquid propellant rocket engines", *Space Technique and Technology (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya)*, 2015, no. 2 (9), pp. 25-38.
4. Khakhulin A.A. "Improving the efficiency of monitoring, diagnosis and management of LPRE", *Sensors and Systems (Datchiki i Sistemy)*, 2008, no. 7, pp.40-44
5. Isaev V.G., Ozerskiy M.D. "The main directions of creation of domestic reusable space systems", *Information Technology Bulletin (Informatsionno-tekhnologicheskii Vestnik)*, 2014, no. 1, pp. 34-43.
6. Efimochkin A.F. "A numerical experiment on the development of elements for computer diagnostics of LPRE", *Rocket and Space Technique and Technology (Raketno-Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya)*, 2009, pp. 123-124
7. Yagodnikov D.A., Chertkov K.O., Antonov V.Yu. "Numerical study of the working process in the reducing gas generator of the oxygen-methane rocket engine of the upper stage", *Aerospace Scientific Journal (Aerokosmicheskii Nauchnyi Zhurnal)*, 2015, no. 5, pp. 12-25.
8. Martirosov D.S., Kolomentsev A.I. "Functional diagnosis of LPRE in real time", *Aerospace Engineering and Technology (Aviatsionno-Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya)*, 2012, no. 7 (94), pp. 197-200.
9. Vasin A.S., Vengerskiy E.V., Usov G.L., Ermolov M.I., Ryabykh V.Yu., Kuchkin V.N. "A method for monitoring and diagnosing a rocket engine" ("Metod kontrolya i diagnostirovaniya raketnogo dvigatelya"), pat. 247850 of the Russian Federation. IPC G01M15 / 14 (2006.01), publ. 02.27.2013.

Submitted 30.06.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Aleksandr F. Efimochkin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Voronezh, Russia), tel. 8 (473) 262-97-74

Aleksey A. Ponomarev, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Voronezh, Russia) e-mail: xaxol_san@mail.ru, tel. 8-920-432-41-01

Maksim A. Lyubinetskiy, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Voronezh, Russia), e-mail: norm_mail@mail.ru, tel. 8-952-544-87-68

ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ И ПЕРИОДА ЗАМЕНЫ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В РЕЖИМЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ

А.В. Анцев, Н.И. Пасько

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Аннотация: рассматривается задача оптимизации скорости резания и периода замены режущего инструмента непосредственно в процессе обработки партии деталей на конкретном металлорежущем станке с учетом вариабельности процесса резания. Так как период стойкости является случайной величиной, то стойкостная зависимость задана в виде закона распределения периода стойкости и зависимости параметров закона распределения от параметров режима резания. В данной работе предполагается, что период стойкости режущего инструмента подчиняется логнормальному распределению. Для учета неопределенности состояния металлорежущего станка при проектировании технологического процесса параметры стойкостной зависимости уточняются последовательно по мере накопления статистических данных о наработке и износе режущего инструмента, а на основании этой зависимости по критерию удельных затрат находится оптимальная на текущем шаге адаптации скорость резания и период замены режущего инструмента. Параметры стойкостной зависимости оцениваются с использованием метода наибольшего правдоподобия. Представлен алгоритм оптимизации скорости резания и периода замены режущего инструмента непосредственно в процессе обработки партии деталей. Предложенное решение иллюстрируется на числовом примере токарной обработки. Показывается сходимость алгоритма к оптимуму по критерию удельных затрат, то есть средних затрат на обработку, износ и замену режущего инструмента и возможный брак, приходящихся на одну обработанную деталь

Ключевые слова: оптимизация, скорость резания, период замены, удельные затраты, стойкостная зависимость, износ, логнормальное распределение, статистика об износе, адаптация, самообучение

Введение

Как правило, режимы резания и период замены режущего инструмента выбираются при проектировании технологических процессов исходя из принятых нормативов и стандартов предприятий. Однако процедура их выбора связана с определенными трудностями, одной из которых является неопределенность состояния машинной части технологической системы операции («станок – приспособление – инструмент – заготовка») из-за следующих особенностей [1]:

1. Отсутствие универсального математического описания технологического процесса, т. е. алгоритма определения состояния машинной части технологической системы Y во время обработки по значениям входных сигналов: управляемого U и неуправляемого, но наблюдаемого X .

2. Недетерминированность (стохастичность) технологического процесса. Данная особенность складывается из нескольких факторов.

Во-первых, необходимо учитывать случайную природу технологического процесса обработки резанием, зависящую от фактора разброса режущих свойств режущих инстру-

ментов одной партии, действующего только при смене режущего инструмента [2-5], фактора разброса твердости и припуска, действующего с начала обработки очередной заготовки [6, 7], и фактора разброса, связанного со стохастическим характером процесса износа, действующего постоянно [8]. Задача существенно осложняется в условиях применения новых конструкционных и инструментальных материалов, новых покрытий инструментальных материалов, новых смазочно-охлаждающих жидкостей, при внедрении новых технологических процессов [9-11], т. е. когда нормативные данные отсутствуют или являются не полными [12, 13]. Данная проблема усугубляется тем фактом, что разброс периода стойкости в пределах одной партии режущего инструмента имеет разброс порядка 15 – 35 % [14].

Во-вторых, это наличие источников случайных помех в самом технологическом оборудовании и окружающей его среде.

В-третьих, это высокая сложность машинной части технологической системы, что обеспечивает большое количество второстепенных (с точки зрения системы управления) процессов, которыми пренебрегают при построении математической модели.

3. Нестационарность машинной части технологической системы операции, проявляющаяся из-за постоянного дрейфа характеристик

металлорежущего станка, т. е. изменением металлорежущего станка во времени [15, 16].

Для учета данной неопределенности в современной литературе предложены соответствующие вероятностные модели, например [8, 17, 18].

Однако учесть реальные производственные условия на стадии проектирования технологического процесса не представляется возможным, что приводит к значительным ошибкам в назначении параметров технологического процесса и увеличению издержек производства, а следовательно, к увеличению цены и снижению конкурентоспособности продукции. Стремление преодолеть указанные недостатки привело к появлению необходимости оптимизировать режимы резания и период замены режущего инструмента непосредственно в производственных условиях в режиме самообучения каждый раз после получения очередной порции статистической информации об износе режущих инструментов, например, каждый раз после очередной замены режущего инструмента или в процессе эксплуатации металлорежущего оборудования [19]. Важно накапливать эту статистику, чтобы уточнять параметры математической модели процесса износа и оптимизировать режим профилактики по уточняющейся модели, т. е. в режиме статистической адаптации.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу оптимизации скорости резания и периода замены режущего инструмента непосредственно в процессе обработки партии деталей на конкретном металлорежущем станке на примере токарной обработки деталей, когда обрабатывается резцом поверхность диаметром D_1 на длине L_1 при глубине резания h и подаче S . Скорость резания V и период замены резца в штуках обработанных деталей g_{Π} следует определить опытным путем в процессе обработки некоторого количества деталей. Первоначально параметры режима резания задаются из априорных соображений. Например, глубина резания назначается исходя из припуска на обработку, а подача исходя из требуемой чистоты обработки с учетом технических ограничений металлорежущего станка. Скорость резания и период замены будем назначать в соответствии с алгоритмом статистической адаптации, приводящим к оп-

тимальным значениям после обработки партии деталей.

В качестве критерия оптимальности примем удельные затраты, то есть средние затраты на обработку одной детали, включающие затраты, связанные непосредственно с временем резания, с износом инструмента и его заменой и с исправлением возможного брака. Для оптимизации достаточно учитывать только ту часть затрат, которая непосредственно зависит от режима резания и периода замены резца.

Особенность оптимизации состоит в том, что период стойкости режущего инструмента даже одной партии является случайной величиной с некоторым законом распределения, параметры которого следует определять по результатам обработки партии деталей. Статистическая адаптация состоит в последовательной оценке параметров этого закона по накопленным статистическим данным об износе режущего инструмента. Точность оценки возрастает с каждым прибавлением статистических данных и, соответственно, точнее рассчитываются удельные затраты, зависящие от закона распределения и его параметров. При этом точнее проводится и оптимизация скорости резания и периода замены режущего инструмента. То есть алгоритм оптимизации как бы самообучается. На выходе получаем более точные параметры стойкостной зависимости, и рассчитанные по такой зависимости значения V и g_{Π} становятся все ближе к глобальному оптимуму. Как только V и g_{Π} стабилизируются, процесс адаптации можно закончить и в дальнейшем использовать последние полученные значения V и g_{Π} . Если ситуация изменилась, например, сменился поставщик режущего инструмента, или поступила партия заготовок с другой твердостью (другая плавка), процесс адаптации возобновляется.

Теоретическая часть

Подробнее рассмотрим процедуру адаптации на примере веерной модели износа при распределении периода стойкости по логнормальному закону [20]. В этом случае плотность распределения периода стойкости T

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta \cdot t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \ln \hat{T})^2}{2\delta^2}\right], \quad (1)$$

где $\hat{T}$ – среднегеометрический период стойкости в минутах времени резания, δ – среднеквадратическое отклонение логарифма периода

стойкости. Коэффициент вариации периода стойкости

$$K_T = \sqrt{\exp(\delta^2) - 1}. \quad (2)$$

Величина износа режущего инструмента $Y(t)$ после наработки t и интенсивность износа $U = Y(t)/t$ тоже распределены по логнормальному закону с параметрами $\hat{Y}(t)$, δ и $\hat{U}$, δ соответственно. При этом

$$\hat{U} = L/\hat{T}, \quad \hat{Y} = \hat{U} \cdot t, \quad (3)$$

где L – предельно допустимый износ режущих инструментов, превышение которого приводит к браку в обработке детали. От скорости резания зависит интенсивность износа $\hat{U}$. Эту зависимость в процессе адаптации будем искать в виде

$$\hat{U} = \exp(b_0 + b_1 \cdot \ln V + b_2 \cdot \ln^2 V). \quad (4)$$

Такая зависимость обобщает известную зависимость Тейлора [8] путем добавления члена с $\ln^2 V$, что позволяет учесть нелинейность зависимости T от V [21]. В логарифмической шкале зависимость (4) становится линейной относительно оцениваемых из опыта коэффициентов b_0 , b_1 и b_2 , что облегчает их вычисление.

Если имеются статистические данные по N режущим инструментам ($N \geq 4$) об их износе Y_i после обработки g_i деталей при различных скоростях V_i

$$(V_i, g_i, Y_i), \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

то параметры стойкостной зависимости b_0 , b_1 , b_2 и δ оцениваются с использованием метода наибольшего правдоподобия [22] следующим образом. Искомые оценки находятся из условия максимума функции правдоподобия

$$\Pr(b_0, b_1, b_2, \delta) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta \cdot Y_i}} \times \exp\left\{-\frac{[\ln Y_i - \ln(\hat{U}(V_i) \cdot t_i)]^2}{2\delta^2}\right\}, \quad (6)$$

или максимума ее логарифма. То есть параметры b_0 , b_1 , b_2 и δ находятся в результате решения системы уравнений

$$\frac{\partial \ln(\Pr)}{\partial b_j} = 0, \quad j = 0, \dots, 2; \quad \frac{\partial \ln(\Pr)}{\partial \delta} = 0.$$

После взятия частных производных и проведения необходимых преобразований получаем линейную систему относительно b_0 , b_1 и b_2

$$b_0 \cdot B_{0j} + b_1 \cdot B_{1j} + b_2 \cdot B_{2j} = C_j, \quad j = 0, \dots, 2, \quad (7)$$

и явное выражение для δ^2

$$\delta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\ln(\frac{U_i}{\hat{U}(V_i)})]^2. \quad (8)$$

В формулах (7)-(8) приняты обозначения:

$$\hat{U}(V_i) = \exp(b_0 + b_1 \cdot \ln V_i + b_2 \cdot \ln^2 V_i);$$

$$U_i = Y_i / t_i; \quad B_{00} = N;$$

$$B_{k,j} = \sum_{i=1}^N (\ln V_i)^{K+J}, \quad (9)$$

$$C_k = \sum_{i=1}^N \ln U_i \cdot (\ln V_i)^k, \quad j, k = 0, \dots, 2.$$

В результате решения системы (7) и уравнения (8) получаем оценку параметров стойкостной зависимости b_0 , b_1 , b_2 и δ , при которых выборка опытных значений (7) наиболее вероятна. В процессе адаптации такая оценка проводится после каждой замены режущего инструмента и точность оценки растет с ростом числа испытанных режущих инструментов, то есть с ростом N . Соответственно для следующего режущего инструмента рассчитывается новое оптимальное значение скорости резания и периода замены режущего инструмента. Математическое ожидание периода стойкости (средняя стойкость)

$$\bar{T} = L \cdot \exp[-b_0 - b_1 \cdot \ln(V) - b_2 \cdot \ln^2(V) + \delta^2/2]. \quad (10)$$

Максимальная средняя стойкость достигается при $V^* = \exp(-\frac{b_1}{2b_2})$.

Критерий оптимальности (удельные затраты) определяются так

$$\Theta(V, g_{\Pi}) = \frac{Z_0 + Z_6 + Z_p}{g_{\Pi}}. \quad (11)$$

Здесь Z_0 – затраты на собственно обработку за период g_{Π} , Z_p – средние затраты, связанные с одной заменой режущего инструмента, Z_6 – средние затраты, связанные с исправлением или заменой возможного брака за время обработки g_{Π} деталей. Рассмотрим два варианта затрат: первый – удельные затраты времени, равные переменной части штучного времени, а второй – затраты в рублях, равные переменной части себестоимости детали на данной операции.

Вначале рассмотрим первый вариант. В этом случае затраты Z_0 пропорциональны g_{Π} и определяются по формуле

$$Z_0 = t_{\text{рез}} \cdot g_{\Pi},$$

где $t_{\text{рез}}$ – время резания или часть длительности цикла обработки детали, зависящая от режима резания, например, при токарной обработке

$$t_{\text{рез}} = \frac{\pi D_1 L_1}{1000 V S}.$$

Затраты Z_0 пропорциональны числу деталей, обработанных затупившимся режущим инструментом, то есть при износе режущего инструмента $Y > L$. Среднее значение этих затрат рассчитывается по формуле

$$Z_0 = \bar{\tau} / t_{\text{рез}} \cdot C_0,$$

где

$$\bar{\tau} = t_{\Pi} - \bar{T}_p$$

среднее время работы режущего инструмента при $Y > L$, $t_{\Pi} = g_{\Pi} \cdot t_{\text{рез}}$ – наработка режущего инструмента до замены в минутах времени резания, $\bar{T}_p$ – среднее время работы режущего инструмента при $Y \leq L$,

$$\bar{T}_p = \int_0^{t_{\Pi}} f(t) dt - \int_{t_{\Pi}}^{\infty} f(t) dt \cdot t_{\Pi},$$

$C_0 = c$ – средние затраты из-за брака одной детали в минутах рабочего времени.

Z_p при первом варианте критерия просто равно среднему времени, связанному с заменой режущего инструмента, то есть $Z_p = t_{\text{зам}}$.

При втором варианте критерия, когда затраты измеряются в рублях, затраты

$$Z_0 = t_{\text{рез}} \cdot g_{\Pi} \cdot C_{\text{см}},$$

где $C_{\text{см}}$ – себестоимость станко-минуты рабочего времени, рассчитываемая, например, по методике [23]. Затраты Z_0 рассчитываются по той же формуле, но $C_0 = c \cdot C_{\text{см}}$. Затраты Z_p определяются так:

$$Z_p = t_{\text{зам}} \cdot C_{\text{см}} + C_{\text{и}} / n_{\Pi}.$$

$C_{\text{и}}$ – цена инструмента, n_{Π} – число переточек. При сменной режущей пластине $C_{\text{и}}$ – цена пластины, а n_{Π} – число режущих граней.

Алгоритм оптимизации

Оптимальные значения V и g_{Π} находятся путем перебора значений $\Theta(V, g_{\Pi})$ во внутреннем цикле по g_{Π} с шагом Δg в диапазоне от g_{-} до g_{+} и во внешнем цикле по V с шагом ΔV в диапазоне от V_{-} до V_{+} . Алгоритм перебора гарантирует нахождение глобального минимума Θ в заданном диапазоне с заданной точностью.

Опишем теперь алгоритм заявленной оптимизации в целом. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1. Необходимые расчеты выполняются с помощью разработанного программного обеспечения StatAdap, которое запускается в начале процесса адаптации и после каждой замены режущего инструмента.

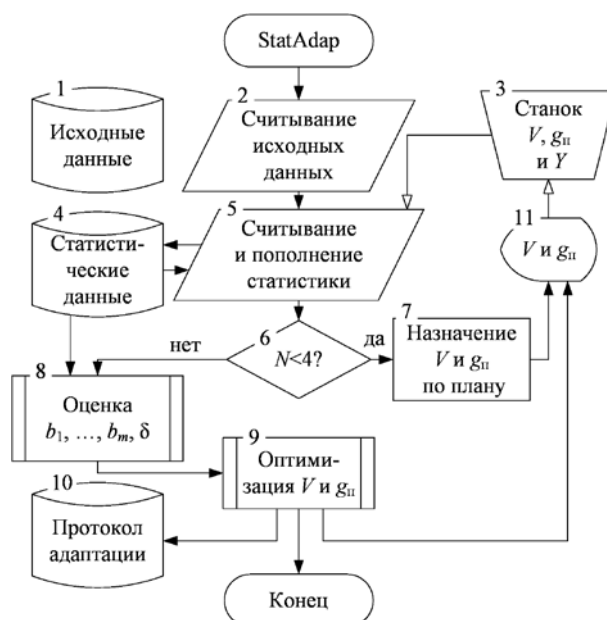


Рис. 1. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации V и g_{Π} в режиме статистической адаптации

Исходные данные программа StatAdap считывает с предварительно подготовленной базы данных. На блок-схеме это блок 1 и блок 2. Пример исходных данных может быть следующим:

- предельный износ $L = 0,4$ мм;
- подача $S = 0,15$ мм/об;
- глубина резания $h = 0,35$ мм;
- твердость по Бринеллю $HB = 150$;
- длина обработки $L_1 = 100$ мм;
- диаметр обработки $D_1 = 50$ мм;
- затраты из-за брака, приходящиеся на единицу наработки $C_b = 15$ мин;

- средние затраты, связанные с заменой режущего инструмента $Z_b = 5$;
- стоимость станкоминуты 100 руб.;
- стоимость режущей пластины 300 руб.;
- число режущих граней пластины 4;
- число шагов адаптации 15;
- диапазон скоростей 35-200 м/мин;
- диапазон периодов замены 5-100 шт.;
- начальная скорость резания 60 м/мин;
- начальный период замены режущего инструмента 50 шт.;
- коэффициенты поиска $\varphi = 1,41$, $\varphi_1 = 2$ и $\varphi_2 = 1,12$.

Статистические данные, необходимые для оценки параметров b_0 , b_1 , b_2 и δ , также хранятся в базе данных (блок 4). Пример статистических данных приведен в табл. 1.

Таблица 1

Пример статистических данных в базе данных

it	V , м/мин	g , шт.	Y , мм
0	60	50	0
1	60	50	0,283
2	85	35	0,144
3	119	28	0,400
4	107	28	0,126
5	127	28	0,173
6	113	20	0,105
7	147	20	0,249

В эту базу данных заносятся данные с металлорежущего станка после каждой замены режущего инструмента, а именно, скорость резания V , наработка режущего инструмента с момента его установки g и износ режущего инструмента Y за этот период. Номер итерации it устанавливается автоматически. Перед первым запуском программы StatAdap база данных должна быть пуста и после каждого и, соответственно, после каждой замены режущего инструмента в базу данных добавляется запись с новыми данными о V , g и Y для замененного режущего инструмента.

При первом запуске программы StatAdap рекомендация для настройки металлорежущего станка на скорость V и период g_{Π} считывается из базы данных и выдается на экран компьютера (блоки 4, 5, 6, 7, 12). В соответствии с этим металлорежущий станок (блок 3) настраивается на этот режим и работает до обработки g_{Π} деталей или до отказа, то есть до первого превышения износом Y предельной величины L .

Следующий шаг алгоритма состоит во втором запуске программы StatAdap, при котором считывается информация из базы данных, но дополнительно вводятся данные с металлорежущего станка, и эти данные добавляются программой в базу данных. Скорости резания для первых трех режущих инструментов задаются так: $V_1 = V_0$, $V_2 = V_1 \cdot \varphi$, $V_3 = V_2 \cdot \varphi$. Нарботки до замены этих режущих инструментов задаются так: $g_{\Pi 1} = g_{\Pi 0}$, $g_{\Pi 2} = g_{\Pi 1} / \varphi_1$, $g_{\Pi 3} = g_{\Pi 2} / \varphi_1$. В рассматриваемом числовом примере принято $\varphi = 1,41$, $\varphi_1 = 2$.

Для четвертого и последующих режущих инструментов V и g_{Π} назначаются в результате оценки параметров стойкостной зависимости b_0 , b_1 , b_2 , δ по формулам (7) и (8) (блок 8) и оптимизации V , g_{Π} по критерию минимальных удельных затрат (блок 9). Отклонение скорости V от оптимума с ростом номера итерации уменьшается. Но в этом с точки зрения полноты статистических данных о стойкостной зависимости есть недостаток, состоящий в чрезмерном снижении области поиска, что не дает гарантии сходимости к глобальному оптимуму. Чтобы область поиска не снижалась до нуля и накапливаемая статистика охватывала более широкую область по скорости, предлагаются рекомендуемые значения скорости, рассчитанные по текущим статистическим данным, увеличивать или уменьшать на некоторую величину в зависимости от четности или нечетности итерации. Например, для четных итераций V умножается на φ_2 , а для нечетных – делится на φ_2 . В нашем примере расчета $\varphi_2 = 1,12$.

Результаты оптимизации выдаются на дисплей (блок 12) и дальше оператором используются для настройки металлорежущего станка на рекомендованный режим (блок 3). После обработки $g \leq g_{\Pi}$ деталей заменяется режущий инструмент, и металлорежущий станок запускается на обработку партии с новыми значениями V и g_{Π} . Далее измеряется износ замененного режущего инструмента и запускается программа StatAdap с данными V , g , Y этого режущего инструмента. С учетом этих данных модуль выдает рекомендуемые оптимальные значения V и g_{Π} , рассчитанные с учетом накопленных в базе данных статистических данных. Рекомендованный период g_{Π} может отличаться от фактического g из-за

возможного отказа, но в базу данных должны заноситься только фактическая наработка режущего инструмента g и износ его после этой наработки Y при скорости резания V .

База данных хранит протокол процесса адаптации. Пример содержания протокола адаптации приведен в табл. 2. Эта таблица базы данных при каждом запуске модуля открывает-

ся в режиме добавления и пополняется по результатам текущей оптимизации (блок 10).

Заканчивается процесс адаптации по достижению стабильных значений V и g_n или после заданного числа шагов. Иллюстрация сходимости процесса к оптимуму представлена на рис. 2 и 3.

Таблица 2

Протокол адаптации программы StatAdap

it	V , м/мин	g_n , шт.	Y , мм	T , мин	Θ , мин/шт.	δ	b_0	b_1	b_2
1	60	50	0,283	123	0,000	0,00	-5,73	0,00	0,00
2	85	35	0,144	120	0,000	0,00	-6,08	0,08	0,00
3	119	28	0,400	25	0,000	0,00	116,52	-57,45	6,74
4	107	28	0,126	87	1,125	0,23	135,36	-65,67	7,62
5	127	28	0,173	54	1,104	0,36	57,78	-30,04	3,55
6	113	20	0,105	70	1,079	0,33	61,55	-31,67	3,72
7	147	20	0,249	23	1,046	0,31	48,12	-25,57	3,03
8	121	20	0,231	30	1,074	0,33	43,99	-23,83	2,85
9	149	19	0,352	15	1,076	0,32	52,36	-27,62	3,28
10	117	20	0,197	36	1,083	0,31	47,09	-25,31	3,03
11	147	20	0,377	15	1,083	0,30	51,55	-27,33	3,26
12	117	20	0,108	66	1,076	0,30	56,88	-29,67	3,51
13	147	20	0,362	16	1,071	0,29	58,80	-30,54	3,61
14	113	22	0,193	42	1,075	0,29	54,12	-28,47	3,38
15	147	20	0,316	18	1,068	0,28	53,19	-28,05	3,33



Рис. 2. Процесс сходимости скорости резания к оптимуму в зависимости от номера итерации и начальных значений:

1 – $V_0=35$ м/мин, $g_{n0}=50$ шт.;

2 – $V_0=60$ м/мин, $g_{n0}=50$ шт.;

3 – $V_0=80$ м/мин, $g_{n0}=50$ шт.;

4 – оптимальный уровень скорости резания $V=126$ м/мин

Как видно из рис. 2 и 3, процесс адаптации при исходных данных, приведенных ранее, практически сходится к оптимуму после пятой итерации, то есть шестой режущий инструмент уже работает на оптимальной скорости резания при оптимальном периоде замены. Отклонение фактической скорости резания от оптимальной

после пятой итерации делается принудительно для получения статистических данных, охватывающих более широкий диапазон скоростей.

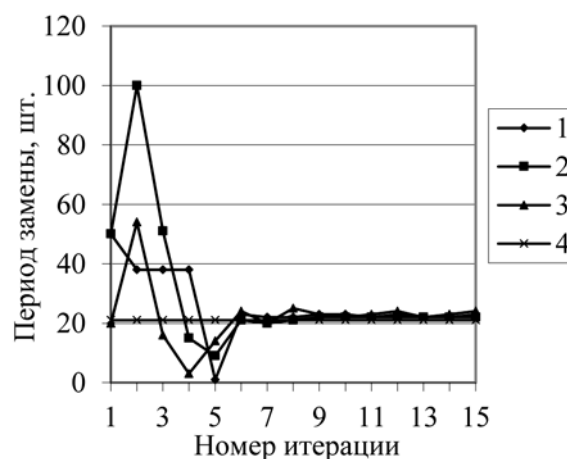


Рис. 3. Процесс сходимости периода замены режущих инструментов к оптимуму в зависимости от номера итерации и начальных значений:

1 – $V_0=35$ м/мин, $g_{n0}=50$ шт.;

2 – $V_0=60$ м/мин, $g_{n0}=50$ шт.;

3 – $V_0=80$ м/мин, $g_{n0}=50$ шт.;

4 – оптимальный период замены режущего инструмента $g_n=21$ шт.

При оптимизации оцениваются и параметры стойкостной зависимости b_0 , b_1 , b_2 , δ . Результаты оценки по каждой итерации сохраняются в базе данных (блок 10) (см. табл. 2). В конце периода адаптации итоговые показатели выводятся на дисплей. Пример итоговых показателей выглядит следующим образом:

- период профилактики 21 шт. или 16,9 мин;
- рациональная скорость резания 126,0 м/мин;
- время резания на деталь 0,806 мин;
- средний период стойкости 32,3 мин;
- коэффициент вариации периода стойкости 0,286;
- удельные затраты 1,06 мин/шт.;
- брак 0,12%;
- коэффициент использования стойкости 0,59.

Заключение

Применение предложенного алгоритма для оптимизации скорости резания и периода замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации способствует повышению эффективности и надежности обработки, сокращению инструментальных затрат и стабилизации ритмичности производственного процесса, что в конечном итоге позволяет повысить экономичность обработки резанием за счет более точной и оперативной оценки параметров процесса резания непосредственно в производственных условиях.

Литература

1. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая Линия-Телеком, 2004. 143 с.
2. Кушнер В.С., Жавнеров А.Н., Удодова А.В. Повышение режущих свойств инструмента при обработке резанием жаропрочных сплавов // Омский научный вестник. 2011. 2 (100). С. 20-23.
3. Макаренко К.В., Толстяков А.Н. Исследование стойкости многогранных неперетачиваемых пластин при токарной обработке термически упрочненной стали 40X2H2MA // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 6 (67). С. 11-15.
4. Верещака А.А., Хожаев О. Повышение эксплуатационных характеристик инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов с помощью наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 3 (43). С. 20-25.
5. Анализ точности профиля эвольвентных червячных фрез с твердосплавными СМП / О.И. Борискин, Н.Г. Стаханов, А.В. Якушенков, С.Я. Хлудов, И.В. Горынина //

Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 3. С. 143-146.

6. Муратов К.Р. Влияние жесткой и фрикционной кинематической связи в контакте инструмент-деталь на равномерность износа инструмента // СТИН. 2015. № 9. С. 23-26.

7. Уткин Е.Ф. Оценка влияния деформационных процессов в контактируемых зонах обрабатываемого и инструментального материалов на износ режущего инструмента // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2007. 3 (29). Т. 1. С. 132-134.

8. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н.И. Пасько, А.В. Анцев, Н.В. Анцева, С.В. Сальников. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 174 с.

9. Попова О.И., Попова М.И., Печенкина Л.С. Пути повышения стойкости червячных фрез // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 134-139.

10. Хван А.Д., Панин П.М. Повышение стойкости стали Р6М5 // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 11.2. С. 122-124.

11. Хван А.Д., Хван Д.В., Осинцев А.Н. Повышение стойкости инструментальной стали Х12М // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 5. С. 131-134.

12. Иноземцев А.Н., Пасько Н.И., Анцев А.В. Автоматизированное управление режимами резания на основе применения самообучающихся систем // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2-6(292). С. 33-40.

13. Иноземцев А.Н., Пасько Н.И., Анцев А.В. Ситуационное управление ресурсом режущего инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 2. С. 21-30.

14. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИН. 2012. № 12. С. 23-27.

15. Конструкторское и технологическое обеспечение точности обработки на станках с гибридной компоновкой / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, А.В. Олейник, А.Ю. Алтухов, П.В. Чаплыгин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2014. №4. С. 15-22.

16. Аникеева О.В., Ивахненко А.Г., Куц В.В. Прогнозирование параметрической надежности прецизионного технологического оборудования // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 2 (298). С. 159-164.

17. Ивченко Т.Г. Прогнозирование параметров закона распределения стойкости режущего инструмента как случайной величины // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2016. № 3 (54). С. 49-54.

18. Vagnorius Z., Rausand M., Sørby K. Determining optimal replacement time for metal cutting tools // European Journal of Operational Research. 2010. № 206. Р. 407-416.

19. Экспериментальная установка контроля вибрации при обработке на станках с ЧПУ/ А.В. Анцев, Ч.Х. Данг, Е.С. Янов, М.В. Полев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 151-158.

20. Анцев А.В., Пасько Н.И., Анцева Н.В. Оптимизация скорости резания и замены инструмента при обработке черных металлов с учетом разброса периода стойкости // Черные металлы. 2019. № 5 (1049). С. 41-46.

21. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1966. 266 с.

22. Анцев А.В., Пасько Н.И. Оценка стойкости в зависимости методом максимального правдоподобия //

Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 8-2. С. 129-138.

23. Темчин Г.И. Многоинструментные наладки. Теория и расчет. М.: МАШГИЗ, 1963. 542 с.

Поступила 08.06.2019; принята к публикации 05.08.2019

Информация об авторах

Анцев Александр Витальевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: a.antsev@yandex.ru

Пасько Николай Иванович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: pasko37@mail.ru

OPTIMIZATION OF THE CUTTING SPEED AND THE CUTTING TOOL REPLACEMENT PERIOD IN THE STATISTICAL ADAPTATION MODE

A.V. Antsev, N.I. Pas'ko

Tula State University, Tula, Russia

Abstract: the article considers the task of optimization of the cutting speed and the cutting tool replacement period directly in the process of machining a batch of parts on a specific metal-cutting machine, taking into account the variability of the cutting process. Since the tool life of a cutting tool is a random variable, the tool life equation is defined in the form of a distribution law of the tool life and the dependence of the parameters of the distribution law on the parameters of the cutting mode. In this paper, it was assumed that the tool life of a cutting tool dispersed according to the lognormal distribution. To take into account the uncertainty of the state of the metal-cutting machine during designing the technological process, the parameters of the tool life equation are estimated sequentially as statistical data on the machining and wear of the cutting tool were accumulated, and based on this dependence, the optimal for the current adaptation step cutting speed and cutting tool replacement period were obtained. The parameters of the stability dependence were estimated using the maximum likelihood estimation. An algorithm for optimizing the cutting speed and the cutting tool replacement period directly during the machining of a batch of parts was presented. The proposed solution was illustrated in a numerical example of turning. It showed the convergence of the algorithm to the optimum according to the criterion of unit costs, i.e. the average cost of machining, replacement of the cutting tool and the possible defect per one processed part

Key words: optimization, cutting speed, replacement period, unit costs, tool life equation, wear, log-normal distribution, wear statistics, adaptation, self-learning

References

1. Uskov A.A., Kuz'min A.V. "Intelligent control technology. Artificial neural networks and fuzzy logic" ("Intellectual'nye tekhnologii upravleniya. Iskusstvennyye neyronnyye seti i nechetkaya logika"), Moscow, Goryachaya Liniya-Telecom, 2004, 143 p.
2. Kushner V.S., Zhavnerov A.N., Udodova A.V. "Improving the cutting properties of the tool when machining high-temperature alloys", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2011, no. 2 (100), pp. 20-23.
3. Makarenko K.V., Tolstyakov A.N. "Investigation of the durability of multi-faceted non-reversible plates during the turning of heat-hardened steel 40X2H2MA", *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2018, no. 6 (67), pp. 11-15.
4. Vereshchaka A.A., Khozhaev O. "Improving the performance characteristics of a tool from tungsten-free hard alloys using nanostructured multilayer composite coatings", *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2014, no. 3 (43), pp. 20-25.
5. Boriskin O.I., Stakhanov N.G., Yakushenkov A.V., Khludov S.Ya., Gorynina I.V. "Analysis of the accuracy profile of involute worm milling cutters with carbide SMP", *Bulletin of Tula State University. Technical science (Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki)*, 2016, no. 3, pp. 143-146.
6. Muratov K.R. "Influence of rigid and friction kinematic coupling in the tool-part contact on the tool wear uniformity", *STIN*, 2015, no. 9, pp. 23-26.
7. Utkin E.F. "Assessment of the influence of deformation processes in the contact zones of the processed and tool materials on the wear of the cutting tool", *News of Volgograd State Technical University (Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2007, vol. 1, no. 3 (29), pp. 132-134.
8. Pas'ko N.I., Antsev A.V., Antseva N.V., Sal'nikov S.V. "Generalized stochastic model of cutting tool failures and its application" ("Obobshchennaya stokhasticheskaya model' otkazov rezhushchego instrumenta i ee primeneniye"), Tula, Publishing House of TSU, 2016, 174 p.
9. Popova O.I., Popova M.I., Pechenkina L.S. "Ways to increase the resistance of worm milling cutters", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 134-139.

10. Khvan A.D., Panin P.M. "Increasing the resistance of steel P6M5", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 11-2, pp. 122-124.
11. Khvan A.D., Khvan D.V., Osintsev A.N. "Increasing the durability of tool steel X12M", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 5, pp. 131-134.
12. Inozemtsev A.N., Pas'ko N.I., Antsev A.V. "Automated control of cutting conditions based on the use of self-learning systems", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i Prikladnye Problemy Tekhniki i Tekhnologii)*, 2012, no. 2-6 (292), pp. 33-40.
13. Inozemtsev A.N., Pas'ko N.I., Antsev A.V. "Situational resource management of the cutting tool", *Bulletin of Tula State University. Technical Science (Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki)*, 2012, no. 2, pp. 21-30.
14. Martinov G.M., Grigor'ev A.S. "Diagnosing cutting tools and predicting their residual durability on CNC machines during processing", *STIN*, 2012, no. 12, pp. 23-27.
15. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Oleinik A.V., Altukhov A.Yu., Chaplygin P.V. "Design and technological support of machining accuracy on machines with a hybrid layout", *Bulletin of South-West State University. Series: Technique and Technology (Izvestiya Yuqo-Zapadnogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Tekhnika i Tekhnologii)*, 2014, no. 4, pp. 15-22.
16. Anikeeva O.V., Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. "Prediction of parametric reliability of precision process equipment", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i Prikladnye Problemy Tekhniki i Tekhnologii)*, 2013, no. 2 (298), pp. 159-164.
17. Ivchenko T.G. "Prediction of the parameters of the law of distribution of the tool life of the cutting tool as a random variable", *Progressive technologies and Systems of Mechanical Engineering (Progressivnye Tekhnologii i Sistemy Mashinostroeniya)*, 2016, no. 3 (54), pp. 49-54.
18. Vagnorius Z., Rausand M., Sørby K. "Determining optimal replacement time for metal cutting tools", *European Journal of Operational Research*, 2010, no. 206, pp. 407-416.
19. Antsev A.V., Dang Ch.Kh., Yanov E.S., Polev M.V. "Experimental installation of vibration control during processing on CNC machines", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 151-158.
20. Antsev A.V., Pas'ko N.I., Antseva N.V. "Optimization of cutting speed and tool replacement in the processing of ferrous metals, taking into account the spread of tool lifetime", *Ferrous Metals (Chernye Metally)*, 2019, no. 5 (1049), pp. 41-46.
21. Makarov A.D. "Wear and durability of cutting tools" ("Iznos i stoykost' rezhushchikh instrumentov"), Moscow, Mashinostroenie, 1966, 266 p.
22. Antsev A.V., Pasko N.I. "Estimation of stochastic dependence by the maximum likelihood method", *Bulletin of Tula State University. Technical Science (Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki)*, 2017, no. 8-2, pp. 129-138.
23. Temchin G.I. "Multi-tool equipment setup. Theory and calculation" ("Mnogoinstrumentnye naladki. Teoriya i raschet"), Moscow, MASHGIZ, 1963, 542 p.

Submitted 08.06.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Aleksandr V. Antsev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Tula State University (92 Lenina Av., Tula 300012, Russia), e-mail: a.antsev@yandex.ru
Nikolay I. Pas'ko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Tula State University (92 Lenina Av., Tula 300012, Russia), e-mail: pas-ko37@mail.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ С ГИБРИДНОЙ КОМПОНОВКОЙ

А.Н. Гречухин¹, В.В. Куц¹, А.В. Олешицкий¹, Ю.Э. Симонова²

¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: статья посвящена изучению вопросов динамического управления процессом аддитивного формообразования изделий. Проведен анализ отечественных и зарубежных трудов по теме исследований. Предложено для динамического управления процессом аддитивного формообразования изделий применять механизмы с гибридной компоновкой, обеспечивающие достаточные углы поворота детали относительно вертикальной оси. Спроектирована установка для аддитивного формообразования изделий на основе механизмов с гибридной компоновкой. Построена модель формообразующей системы оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой. Решена задача параметрического синтеза устройства для динамического управления процессом аддитивного формообразования изделий, в результате чего определены допустимые значения длин штанг установки для аддитивного формообразования при неизменных размерах основания и подвижной платформы установки. Выявлены зависимости величины длин штанг в зависимости от конструктивных параметров формообразуемого изделия. Так, с увеличением радиуса формируемой поверхности в форме полусферы наблюдается уменьшение диапазона длин штанг, обеспечивающих в процессе формообразования контакт экструдера со всеми точками формируемой детали (внутренними точками детали и точками на её поверхности); установку нормали к поверхности детали в формируемой точке для всех точек поверхности детали вдоль оси экструдера. Предлагаемая методика позволяет сформировать пространство проектных параметров аддитивной установки, реализующей динамическое управление ориентацией формируемой детали в процессе формообразования, исходя из условий контакта экструдера со всеми точками формируемой поверхности; установления нормали к поверхности вдоль оси экструдера; размещения штанг подвижной платформы формируемой детали в рабочем пространстве установки

Ключевые слова: аддитивные технологии, послойный синтез, формообразование, погрешность

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых МК-6406.2018.8

Введение

Формообразование деталей методами характеризуется высокими величинами погрешности формы. Это связано с тем, что формирование поверхностного слоя детали сложной формы происходит послойно (слоями), а ориентация конечного звена формообразующей системы (экструдера) аддитивной установки при этом неизменна и независима от кривизны формируемой поверхности [1-3]. Для снижения величины погрешности формы детали необходимо при формировании точек поверхности обеспечить её ориентацию, при которой нормаль в точке формообразуемой поверхности будет совпадать с осью конечного звена формообразующей системы (рис. 1) [17-23].

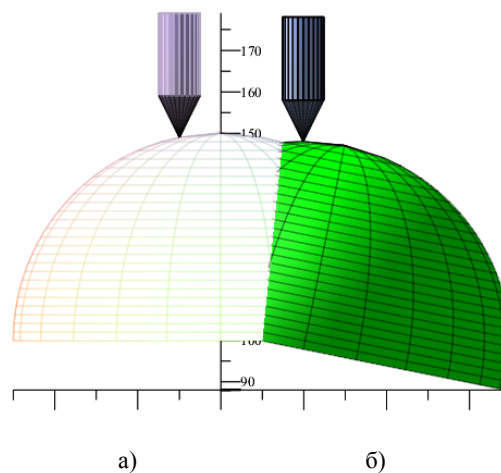


Рис. 1. Формирование точки на поверхности детали: а) традиционным способом; б) с динамической ориентацией детали относительно оси экструдера

Проектирование оборудования для динамического управления процессом аддитивного формообразования детали

Для решения задачи динамического управления процессом аддитивного формооб-

разования в работе [4] было предложено использовать механизм с параллельной кинематикой – гексапод, обладающий шестью степенями свободы, на подвижной платформе которого происходит формирование детали. При приближении экструдера аддитивной установки к поверхности детали гексапод изменяет ее ориентацию, обеспечивая совпадение оси экструдера и нормали к поверхности детали в формируемой точке.

Однако применение лишь механизмов с параллельной кинематикой не обеспечивает достаточные углы поворота детали относительно вертикальной оси. Для устранения этого недостатка предлагается создать установку с гибридной компоновкой (рис. 2).

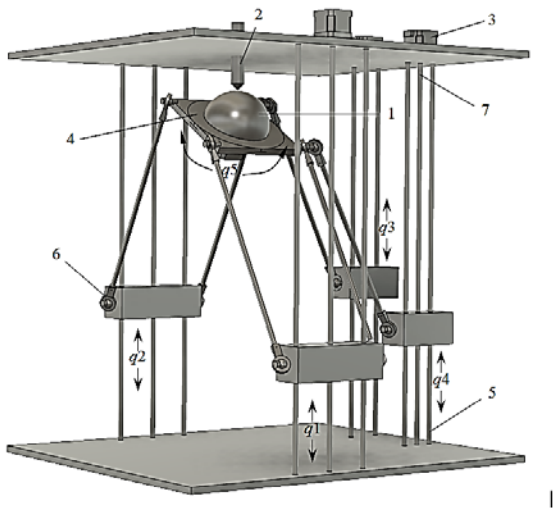


Рис. 2. Аддитивная установка с гибридной компоновкой:
1 – формируемая деталь; 2 – экструдер; 3 – шаговые двигатели; 4 – вращающийся стол; 5 – направляющие; 6 – шарниры; 7 – ходовые винты

В основе проектируемого оборудования для аддитивного формообразования лежит механизма параллельной структуры со штангами постоянной длины. На подвижной платформе предлагается установить поворотный стол, что позволит при наличии 5-ти степеней свободы реализовать углы разворота детали относительно вертикальной оси в диапазоне $\pm\pi$. Это позволит улучшить доступ к точкам поверхности формируемой детали.

Данная установка имеет 5 степеней свободы: перемещение по оси X , Y и Z ; наклон платформы относительно оси X ; вращение стола относительно оси Z .

Основной задачей проектирования технологического оборудования является задача параметрического синтеза, решение которой

позволит сформировать пространство проектных параметров, обеспечивающих на ранних стадиях проектирования, требуемые формообразующие возможности установки, такие как:

- возможность контакта экструдера со всеми точками формируемой детали (внутренними точками детали и точками на её поверхности);
- возможность установки нормали к поверхности детали для всех точек поверхности детали вдоль оси экструдера (см. рис. 1).

Построение модели формообразующей системы оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой

Решение поставленной задачи возможно путем составления на основании обобщенной модели механизмов с параллельной кинематикой [3], системы из шести уравнений в соответствии с количеством штанг:

$$\begin{cases} L = |\bar{R}_1(q_1) - A_{21}(u, v)\bar{S}_1|; \\ L = |\bar{R}_2(q_1) - A_{21}(u, v)\bar{S}_2|; \\ L = |\bar{R}_3(q_2) - A_{21}(u, v)\bar{S}_3|; \\ L = |\bar{R}_4(q_2) - A_{21}(u, v)\bar{S}_4|; \\ L = |\bar{R}_5(q_3) - A_{21}(u, v)\bar{S}_5|; \\ L = |\bar{R}_6(q_4) - A_{21}(u, v)\bar{S}_6|, \end{cases} \quad (1)$$

где L – длины штанг; $\bar{R}_1(q_1), \bar{R}_2(q_1), \dots, \bar{R}_6(q_4)$ – векторы, определяющие положение подвижных шарниров в системе координат основания установки; $q_1, \dots, q_4$ – управляемые координаты установки, определяющие положение шарниров по оси Z ; $A_{21}(u, v)$ – матрица, определяющая положение подвижной платформы, при котором экструдер будет контактировать с точкой поверхности детали с координатами (u, v) , а его ось будет совпадать с нормалью к поверхности детали; $\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_6$ – векторы, задающие положение шарниров подвижной платформы в её собственной системе координат.

Ввиду избыточности данной системы уравнений для проектируемой установки, её можно привести к виду

$$\begin{cases} L = |\bar{R}_1(q_1) - A_{21}(u, v) \bar{S}_1|; \\ L = |\bar{R}_4(q_2) - A_{21}(u, v) \bar{S}_4|; \\ L = |\bar{R}_5(q_3) - A_{21}(u, v) \bar{S}_5|; \\ L = |\bar{R}_6(q_4) - A_{21}(u, v) \bar{S}_6|. \end{cases} \quad (2)$$

Матрицу $A_{21}(u, v)$ определим путем составления уравнения геометрического замыкания (рис. 3) систем координат установки

$$A_{23} = A_{21}(u, v) \cdot A_{10}(q_5) \cdot A_{0j}(u, v), \quad (3)$$

где $A_{23} = A^{(3)}(H - h_e)$ – матрица, определяющая положение экструдера в системе координат основания; H – высота установки; h_e – длина экструдера; $A^{(3)}$ – матрица перехода по оси Z

$$A^{(3)}(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H - h_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$A_{10}(q_5)$ – матрица, определяющая поворот стола с формируемой деталью на величину q_5 относительно его исходного положения:

$$A_{10}(q_5) = A^{(6)}(q_5) = \begin{bmatrix} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & 0 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$A_{0j}(u, v)$ – матрица перехода из системы координат детали в систему координат точки формируемой поверхности с координатами (u, v) , метод расчета которой приведен в [1].

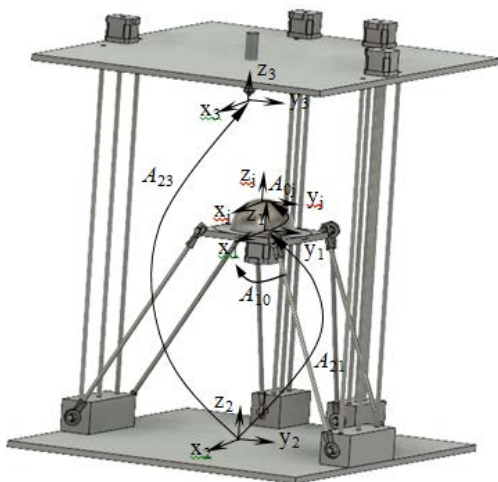


Рис. 3. Модель установки для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой

Матрицу $A_{21}(u, v)$ найдем как

$$A_{21}(u, v) = A_{23} \cdot [A_{10}(q_5) \cdot A_{0j}(u, v)]^{-1}. \quad (6)$$

Параметр поворота стола q_5 и соответствующая матрица $A_{10}(q_5)$ могут быть найдены решением векторного уравнения:

$$\bar{e}_1 \cdot \bar{e}_{3j3} = 0, \quad (7)$$

где $\bar{e}_1$ – орт, определяющий положительное направление оси X_3 системы координат экструдера $\bar{e}_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$; $\bar{e}_{3j3}$ – орт, определяющий положительное направление оси Z_j системы координат точки на поверхности детали, представленный в системе координат экструдера

$$\bar{e}_{3j3} = [A_{23}]^{-1} A_{10}(q_5) \cdot A_{0j}(u, v) \cdot \bar{e}_3, \quad (8)$$

где $\bar{e}_3$ – орт, определяющий положительное направление оси Z_j системы координат точки на поверхности детали $\bar{e}_3 = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$

Матрица $A_{21}(u, v)$ при ее вычислении по (8) содержит перемещения по шести направлениям (шесть степеней свободы), что не соответствует формообразующим движениям подвижной платформы проектируемой установки (четыре степени свободы). Необходимо матрицу $A_{21}(u, v)$ заменить эквивалентной матрицей

$$A_{21}^*(x, y, z, \beta_x) = A^{(1)}(x) \cdot A^{(2)}(y) \cdot A^{(3)}(z) \cdot A^{(4)}(\beta_x) \quad (9)$$

параметры которой могут быть определены путем решения системы векторных уравнений

$$\begin{cases} \bar{e}_3 \cdot A_{23}^{-1} \cdot A_{21}^*(x, y, z, \beta_x) \cdot A_{10}(q_5) \cdot A_{0j}(u, v) \cdot \bar{e}_3 = 1; \\ A_{21} \cdot A_{10}(q_5) \cdot A_{0j}(u, v) \cdot \bar{e}_4 = A_{21}^*(x, y, z, \beta_x) \cdot A_{10}(q_5) \cdot A_{0j}(u, v) \cdot \bar{e}_4. \end{cases} \quad (10)$$

С применением системы уравнений (2) становится возможным определить точки на пространстве проектных параметров, при которых данная система имеет решение и которые, таким образом, будут являться областью их допустимых значений.

Результаты решения задачи параметрического синтеза устройства для динамического управления процессом аддитивного формообразования изделий

Рассмотрим в качестве примера нахождение области допустимых значений длин штанг установки при неизменных размерах основания и подвижной платформы установки (рис. 4).

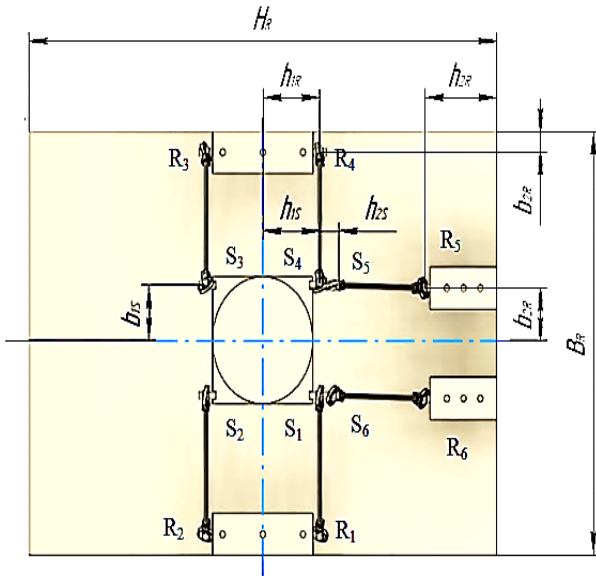


Рис. 4. Схема основания и подвижной платформы установки, определяющие положение шарниров

Тогда векторы, определяющие положение подвижных шарниров в системе координат основания установки (см. рис. 4), зададим как

$$\bar{R}_1 = [h_{1R} \quad -(\frac{B_R}{2} - b_{1R}) \quad q_1 \quad 1]^T;$$

$$\bar{R}_4 = [h_{1R} \quad (\frac{B_R}{2} - b_{1R}) \quad q_2 \quad 1]^T;$$

$$\bar{R}_5 = [\frac{H_R}{2} - h_{2R} \quad b_{2R} \quad q_3 \quad 1]^T;$$

$$\bar{R}_6 = [\frac{H_R}{2} - h_{2R} \quad -b_{2R} \quad q_4 \quad 1]^T.$$

Векторы, задающие положение шарниров подвижной платформы в её собственной системе координат, зададим как:

$$\bar{S}_1 = [h_{1S} \quad -b_{1S} \quad 0 \quad 1]^T;$$

$$\bar{S}_4 = [h_{1S} \quad b_{1S} \quad 0 \quad 1]^T;$$

$$\bar{S}_5 = [h_{1S} + h_{2S} \quad b_{1S} \quad 0 \quad 1]^T;$$

$$\bar{S}_6 = [h_{1S} + h_{2S} \quad -b_{1S} \quad 0 \quad 1]^T.$$

Зададим параметры установки (см. рис. 4): высота устройства $H = 600$ мм; длина экструдера $h_e = 100$ мм; параметры расположения шарниров:

$H_R = 500$ мм; $h_{1R} = 85$ мм; $h_{2R} = 85$ мм; $B_R = 650$ мм; $b_{1R} = 25$ мм; $b_{2R} = 65$ мм; $h_{1S} = 85$ мм; $h_{2S} = 20$ мм; $b_{1S} = 65$ мм; $h_c = 20$ мм.

В таблице показаны величины минимальной L_{min} и максимальной L_{max} длин штанг при формировании деталей типа полусферы, описываемой уравнением

$$r_0(\theta; z) = \begin{bmatrix} \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \cos(\theta) \\ \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \sin(\theta) \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где θ, z – криволинейные координаты поверхности; R – радиус полусферы ($R=50..100$ мм).

Рассчитанные величины допустимых значений длин штанг

z, мм	R, мм					
	50		75		100	
	L_{min}	L_{max}	L_{min}	L_{max}	L_{min}	L_{max}
0	319	387	319	363	319	339
5	313	384	315	361	316	338
15	300	380	306	357	310	335
25	284	380	297	356	303	333
40	260	388	282	356	292	331
50	235	422	271	357	284	331
75	-	-	235	397	264	337
100	-	-	-	-	235	373

В таблице величины L_{min} определены на основе решения системы уравнений (2) для различных значений величин параметра полусферы z , входящего в уравнение (11), а величина L_{max} определена ограничениями размеров рабочей зоны.

На рис. 5 показана область допустимых значений длин штанг аддитивного оборудования при различных значениях радиуса формируемой детали в виде полусферы.

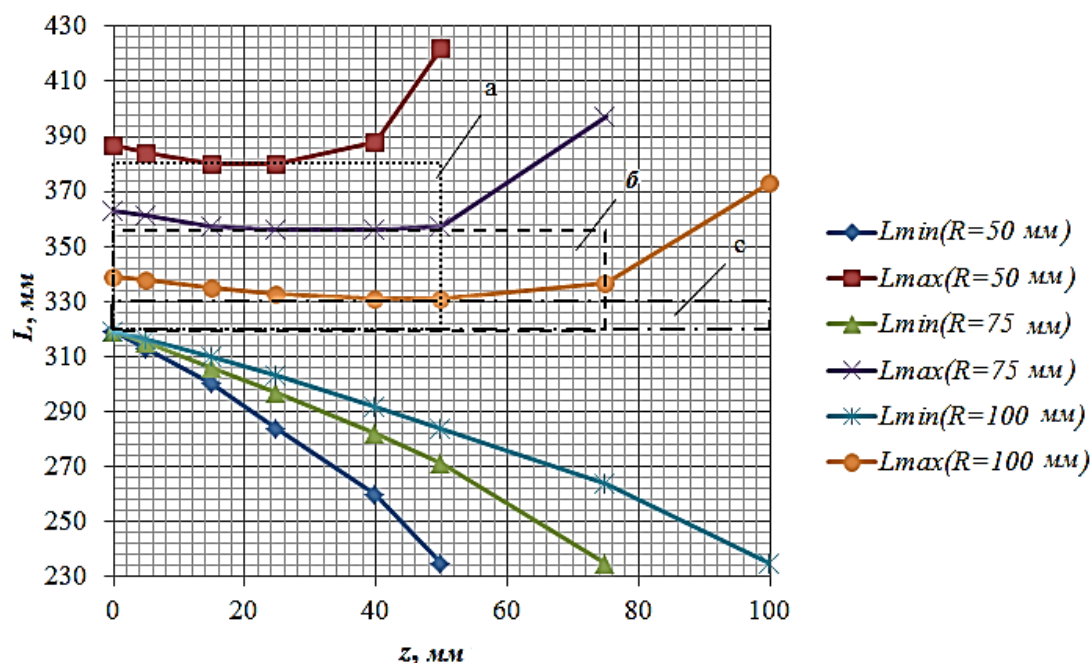


Рис. 5. Область допустимых значений длин штанг L : а — при величине радиуса полусферы $R=50$ мм; б — при величине радиуса полусферы $R=75$ мм; с — при величине радиуса полусферы $R=100$ мм

Таким образом, с увеличением радиуса формируемой поверхности в форме полусферы наблюдается уменьшение диапазона длин штанг, обеспечивающих в процессе формообразования: контакт экструдера со всеми точками формируемой детали (внутренними точками детали и точками на её поверхности); установку нормали к поверхности детали в формируемой точке для всех точек поверхности детали вдоль оси экструдера.

Так, для обеспечения обозначенных выше условий формообразования полусферы с $R=50$ мм область допустимых значений длин штанг находится в диапазоне $L=319..380$ мм; $R=75$ мм - $L=319..356$ мм; $R=100$ мм; $L=319..331$ мм.

Аналогичным образом может быть получена область допустимых значений и для других параметров проектируемой установки.

Заключение

Таким образом, на основе описанного выше метода становится возможным сформировать пространство проектных параметров аддитивной установки, реализующей динамическое управление ориентацией формируемой детали в процессе формообразования, исходя из условий контакта экструдера со всеми точками формируемой поверхности; установления нормали к поверхности вдоль оси экструдера; размещения штанг на подвижной платформе формируемой детали в рабочем пространстве установки.

Литература

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs, N.J., USA: PTR Prentice Hall, 1993. 369 pp.
2. Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01: защищена 19.11.06: утв. 13.04.07. Юрга: Томский политехнический университет, 2006.
3. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. Т. 1: Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов и др.; под общ. ред. А.С. Проникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. 444 с.
4. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms/ V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, N.A. Bychkova// International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 24. С. 11832-11835.
5. Трансфер аддитивных технологий: промышленность Курской области: монография / Л.М. Червяков, Н.А. Бычкова, Н.В. Елисеева и др. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. 168 с.
6. Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Чернышов С.И. Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3d модели // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2010. № 24. С. 13-21.
7. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2. Nos. 1-4. P. 319-328.
8. Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2006. № 28. P. 307-313.

9. Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm // *Computers & Industrial Engineering*. 2004. P. 426–431.
10. Hur J., Lee K. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 1998. № 14. P. 247–254.
11. Kim J.Y.C., Lee K., Park J.C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping // *Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering*. Seoul: Seoul National University, 1994.
12. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus / P.T. Lan, S.Y. Chou, L.L. Chent, D. Gemmill // *Computer-Aided Design*. 1997. Vol. 29. № 1. P. 53–62.
13. Massod S.H., Rattanawong W., Iovenitti P. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping // *J. Mater. Process. Technol.* 2003. Vol. 139. № 1–3. P. 110–116.
14. Masood S.H., Rattanawong W. A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2002. № 19. P. 209–216.
15. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами: монография. Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2010.
16. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: монография. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 1997. 391с.
17. Емельянов С.Г. Разработка теории, методов и средств формирования поверхностей сборными металлорежущими инструментами на основе системного моделирования процесса их проектирования: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. 407с.
18. Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2012. 366с.
19. Куц В.В., Пономарев В.В. Построение модели формообразования длинных валов с РК-профилем сборной дисковой фрезой // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2017. № 2 (322). С. 110–115.
20. Определение погрешности формы детали при формообразовании планетарным механизмом методами геометрической теории резания / В.А. Гречишников, В.В. Куц, М.С. Разумов и др. // *СТИН*. 2017. № 4. С. 24–26.
21. Errors in shaping by a planetary mechanism / V.A. Grechishnikov, V.B. Romanov, P.M. Pivkin, V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, S.Y. Yurasov // *Russian Engineering Research*. 2017. Т. 37. № 9. С. 824–826.
22. Improving the accuracy of additive forming methods Innovation, quality and service in engineering and technology / A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, M.S. Razumov and others. 2018. Pp. 128–131.
23. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products *Bulletin of Voronezh state technical University*. 2018. № 4. Pp. 122–129.
24. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Experimental determination of the cross-section parameters of a single layer in the additive forming products *News of Tula state University. Technical science*. 2018. №10. Pp. 264–270.
25. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry MATEC: *Web of Conferences*. 2018. Vol. 7. Pp. 128–136.
26. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming MATEC: *Web of Conferences*. 2018. Vol. 7. Pp.142–150.
27. Development of information-analytical system for technological requests monitoring, taking into account regional specifics *International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering* / A.N. Grechukhin, M.S. Razumov, D.V. Kudelina and others. 2018. Vol. 157. Pp. 198–202.

Поступила 07.06.2019; принята к публикации 05.08.2019

Информация об авторах

Гречухин Александр Николаевич - канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел. 8(4712)222669, e-mail: Agrechuhin@mail.ru

Куц Вадим Васильевич - д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел. 8(4712)222669, e-mail: kucvadim@yandex.ru

Олешицкий Алексей Вячеславович - соискатель, Юго-Западный государственный университет (305000, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел. 8(4712)222669, e-mail: oav46@yandex.ru

Симонова Юлия Эдуардовна - старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: jsim2@bk.ru, тел. 8(473)246-19-77

DESIGNING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR ADDITIVE FORMING WITH A HYBRID COMPONENT

A.N. Grechukhin¹, V.V. Kuts¹, A.V. Oleshitsky¹, Yu.E. Simonova²

¹Southwest State University, Kursk, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article is devoted to the study of issues of dynamic control of the process of additive shaping products. The analysis of domestic and foreign works on the topic of research was carried out. It was proposed to apply mechanisms with a hybrid arrangement for ensuring the dynamic control of the process of additive shaping of products, ensuring sufficient angles of rotation of the part relative to the vertical axis. An installation for additive shaping of products based on mechanisms with hybrid layout was designed. A model of a molding system of equipment for additive shaping with a hybrid layout was built. The problem of parametric synthesis of the device for the dynamic control of the process of additive shaping of products was solved, as a result of which the allowable values of the lengths of the booms of the installation for additive shaping with constant dimensions of the base and the movable platform of the installation were determined. The dependences of the lengths of the rods depending on the design parameters of the product being formed were revealed. Thus, with an increase in the radius of the formed surface in the form of a hemisphere, a decrease in the range of rod lengths is observed, which during the shaping process ensure contact of the extruder with all points of the formed part (internal points of the part and points on its surface), setting the normal to the surface of the part at the formed point for all points on the surface of the part along the extruder axis. The proposed method allows one to form the space of the design parameters of the additive unit that implements the dynamic control of the orientation of the formed part in the process of shaping based on the conditions of contact of the extruder with all points of the formed surface; establishing a normal to the surface along the axis of the extruder; placing rods movable platform molded parts in the workspace installation

Key words: additive technologies, layer-by-layer synthesis, shaping, error

Acknowledgements: The study was supported by the Grant of the President of the Russian Federation for young scientists MK-6406.2018.8

References

1. Burns M. "Automated fabrication: improving productivity in manufacturing", Englewood Cliffs, N.J., USA: PTR Prentice Hall, 1993, 369 p.
2. Saprykin A.A. "Improving the performance of the process of selective laser sintering in the manufacture of prototypes" ("Povyshenie proizvoditel'nosti protsessa selektivnogo lazernogo spekaniya pri izgotovlenii prototipov"), Cand. tech. Sciences diss., Yurga: Tomsk Polytechnic University, 2006.
3. Pronikov A.S., Averyanov O.I., Apollonov Yu.S. et al. "Designing of metal-cutting machine tools and machine tools: Reference book-textbook" ("Proektirovanie metallorazhushchikh stankov i stanochnykh sistem: Spravochnik-uchebnik"), Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, Mashinostroenie, 1994, 444 p.
4. Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Bychkova N.A. "Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms", *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 24, pp. 11832-11835.
5. Chervyakov L.M., Bychkova N.A., Eliseeva N.V. et al. "Transfer of additive technologies: industry of the Kursk region" ("Transfer additivnykh tekhnologiy: promyshlennost' Kurskoy oblasti: monografiya"), monograph, "Universitetskaya kniga", 2016, 168 p.
6. Dobroskok V.L., Abdurayimov L.N., Chernyshov S.I. "Rational orientation of products with their layer-by-layer shaping based on the original triangulation 3d model", *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University (Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta)*, 2010, no. 24, pp. 13-21.
7. Singhal S.K., Pandey A.P., Pandey P.M., Nagpal A.K. "Optimum part deposition orientation in stereolithography", *Computer-Aided Design & Applications*, 2005, vol. 2, no. 1-4, pp. 319-328.
8. Hong S. Byun, Kwan H. Lee "Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2006, no. 28, pp. 307-313.
9. Hong S. Byun, Kwan H. Lee "Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm", *Computers & Industrial Engineering*, 2004, pp. 426-431.
10. Hur J., Lee K. "The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 1998, no. 14, pp. 247-254.
11. Kim J.Y.C., Lee K., Park J.C. "Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping", *Technical Report*, Department of Mechanical Design and Production Engineering, Seoul, Seoul National University, 1994.
12. Lan P.T., Chou S.Y., Chent L.L., Gemmill D. "Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus", *Computer-Aided Design*, 1997, vol. 29, no. 1, p. 53-62.
13. Massod S.H., Rattanawong W., Iovenitti P. "A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping", *J. Mater. Process. Technol*, 2003, vol. 139, no. 1-3, pp. 110-116.
14. Masood S.H., Rattanawong W. "A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2002, no. 19, pp. 209-216.
15. Egorov I.N. "Positional-power control of robotic and mechatronic devices" ("Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami: monografiya"), monograph, Vladimir State University, 2010.

16. Lashnev S.I., Borisov A.N., Emelyanov S.G. "Geometric theory of surface formation by cutting tools" ("Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostey rezhushchimi instrumentami: monografiya"), monograph, Kursk State Technical University, 1997, 391 p.
17. Yemelyanov S.G. "Development of the theory, methods and means of forming surfaces by modular metal-cutting tools based on system modeling of the design process" ("Razrabotka teorii, metodov i sredstv formirovaniya poverkhnostey sbornymi metallorezhushchimi instrumentami na osnove sistemnogo modelirovaniya protsessa ikh proyektirovaniya"), dr. tech. sc. diss., Moscow, 2001, 407 p.
18. Kuts V.V. "Methodology of pre-project studies of specialized metal-cutting systems" ("Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallorezhushchikh sistem"), dr. tech. sc. diss., Kursk, 2012, 366 p.
19. Kuts V.V., Ponomarev V.V. "Building a model of shaping long shafts with a RK - profile of a composite disc cutter", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2017, no. 2 (322), pp. 110-115
20. Grechishnikov V.A., Kuts V.V., Razumov M.S. et al. "Determination of the part shape error when the planetary mechanism forms the methods of the geometric theory of cutting", *STIN*, 2017, no. 4, pp. 24-26.
21. Grechishnikov V.A., Romanov V.B., Pivkin P.M., Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Yurasov S.Y. "Errors in shaping by a planetary mechanism", *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 9, pp. 824-826.
22. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. et al. "Improving the accuracy of additive forming methods", *Innovation, quality and service in engineering and technology*, 2018, pp. 128-131
23. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. "Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2018, no.4, pp. 122-129
24. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. "Experimental determination of the cross-section parameters of a single layer in the additive forming products", *News of Tula state University. Technical science*, 2018, no.10, pp. 264-270
25. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. "Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system five axis manufacturing machinery for additive generation of geometry", *MATEC: Web of Conferences*, 2018, vol. 7, pp. 128-136
26. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. "Ways to reduce the error of additive methods of forming", *MATEC: Web of Conferences*, 2018, vol. 7, pp. 142-150
27. Grechukhin A.N., Razumov M.S., Kudelina D.V. et al. "Development of information-analytical system for technological requests monitoring, taking into account regional specifics", *International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 157, pp. 198-202.

Submitted 07.06.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Aleksandr N. Grechukhin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Southwest State University (94 50 letiya Oktyabrya str., Kursk 305000, Russia), tel. 8(4712)222669, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Vadim V. Kuts, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Southwest State University (94 50 letiya Oktyabrya str., Kursk 305000, Russia), tel. 8(4712)222669, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Andrey V. Oleshitsky, Seeker, Southwest State University (94 50 letiya Oktyabrya str., Kursk 305000, Russia), tel. 8(4712)222669, e-mail: oav46@yandex.ru

Yuliya E. Simonova, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: jsim2@bk.ru, tel. 8(473)246-19-77

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ФОРСАЖНОЙ ТУРБИНОЙ НА РАКЕТЕ-НОСИТЕЛЕ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

В.Д. Горохов, М.А. Любинецкий, А.А. Пономарев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена концепция инновационного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) с дополнительной форсажной турбиной, внесенной в конструкцию турбонасосного агрегата. Использование данного двигателя на первой и второй ступенях ракеты-носителя (РН) позволит осуществить резервирование РН по тяге. Актуальность работы обусловлена высоким показателем аварийности ракет-носителей в мире и в России в частности. Применение рассмотренной в статье конструкции ЖРД позволит снизить этот показатель до минимально возможного значения и сделать российские РН более конкурентоспособными на мировом рынке. В работе рассмотрена зависимость изменения надежности двигателя от режима работы, приведены результаты сравнительного анализа показателей надежности ЖРД при работе в связке из нескольких двигателей, проведен расчет параметров и сравнительный анализ форсированного режима ЖРД, выполненного по классической схеме с форсированным режимом инновационного двигателя с форсажной турбиной, определены основные преимущества инновационной схемы. Проведена оценка возможности использования инновационного двигателя для резервирования ракет-носителей. Полученные результаты подтверждают актуальность дальнейшей проработки данного схемного решения для реализации возможности горячего резервирования РН в течение продолжительного времени

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, турбина, надежность, резервирование, форсаж

Введение

Начиная с 1957 года по настоящее время, в мире было произведено 5597 космических запусков. Из них 651 пуск (11,6%) был аварийным. Россия – лидер по числу запущенных ракет, неудачными были около 12% от всех российских и советских космических пусков. Это больше, чем в Китае или Европе, но меньше, чем в США [1].

По результатам анализа статистических данных аварийных пусков ракет с ЖРД установлено, что число отказов, приходящихся на долю двигательных установок, доходит до 41% от общего количества аварий РН. Это естественно, так как двигательная установка в ракетном техническом комплексе – это мощная энергетическая система, функционирование которой связано с реализацией сложных физических процессов [2].

Постановка задачи

Современные конструкции ракетных двигателей состоят из большого количества различных узлов и агрегатов. Так как выход из строя (отказ) практически любого элемента двигателя приводит к отказу конструкции в це-

лом, то это значит, что возможность безотказной эксплуатации может резко уменьшаться с усложнением конструкции, к чему неизбежно ведут перспективные задачи, стоящие перед ракетной техникой в современном мире [3].

На рис. 1 приведена зависимость изменения надежности двигателя от режима работы, полученная при отработке ЖРД РД0120.

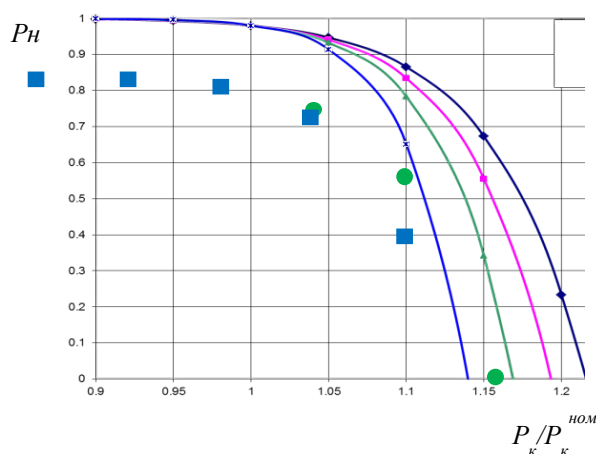


Рис. 1. Зависимость изменения надежности двигателя от режима работы на примере двигателя РД0120

Примечание:

1. P_k – давление в камере;
2. $P_k / P_{k, ном}$ – отношение реального давления в камере к номинальному;
3. P_n – показатель надежности двигателя;
4. Отметки на графике – зависимость, полученная при отработке двигателя РД0120

Из экспериментально полученных данных, приведенных на рис. 1, следует, что при работе на номинальном режиме ($P_k/P_k^{\text{ном}}=1$) надежность двигателя приближается к 1, а далее при увеличении давления в камере (форсировании) стремительно падает.

Таким образом, на сегодняшний день ставится задача повысить надежность РН, предусмотрев возможность отказа одного или даже нескольких двигателей.

Одним из эффективных способов, позволяющих создавать системы, надежность которых может быть выше надежности входящих в них элементов, является резервирование. Резервированием называется метод повышения надежности путем включения резервных элементов при разработке систем или в процессе их эксплуатации [4]. Реализация резервирования в ракетной технике в настоящий момент – сложная задача, связанная прежде всего с большим увеличением стоимости запусков, так как стоимость двигателей является основной частью стоимости РН, а установка дополнительных элементов неизбежно ведёт к увеличению стартовой массы ракеты-носителя, что, в свою очередь, негативно сказывается на массе выводимой полезной нагрузки.

В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа показателей надежности ЖРД: двигательная установка (ДУ) из связки n двигателей при m -кратности резервирования.

Таблица 1
Сравнение надежности РН с использованием горячего резервирования и без

Надежность ЖРД $P_1=0,99$		Отсутствие резервирования	Резервирование на отказ m двигателей		
			1	2	3
Количество двигателей в ДУ	1	0,99	--	--	--
	2	0,9801	0,9999	--	--
	3	0,970299	0,999702	0,999999	--
	4	0,960596	0,999408	0,999996	1
	5	0,95099	0,99902	0,99998	1
	6	0,94148	0,99845	0,99998	1
	7	0,932065	0,997969	0,999966	1
	8	0,922745	0,99731	0,999946	0,999999
	9	0,913517	0,996564	0,99992	0,999999

Таким образом, очевидно, что резервирование ЖРД позволит уменьшить риск аварии РН в случае отказа одного или даже нескольких двигателей до минимального значения.

В настоящий момент существует два способа произвести резервирование ЖРД:

1. Установка дополнительного двигателя в блоке, включающегося только в случае отказа одного из маршевых двигателей.

2. Форсирование работающих ЖРД в случае отказа одного или нескольких двигателей.

Первый вариант является экономически нецелесообразным из-за высокой стоимости ракетных двигателей и большого увеличения массы блоков, а второй ведёт к скорейшему износу агрегатов форсированных ЖРД из-за увеличения температуры генераторного газа при форсировании, что приводит к разрушению лопаток турбины ТНА. Очевидно, что ЖРД, выполненные по классической схеме, не могут работать в форсированном режиме в течение времени, необходимого для выполнения задачи.

Концепция инновационного ЖРД, позволяющая организовать резервирование в РН

В данной статье рассматривается концепция использования инновационного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) с форсажной турбиной в качестве маршевого двигателя для 1-2 ступеней РН [5]. В основе концепции данного двигателя лежит возможность форсирования ЖРД по тяге при помощи внесения в конструкцию дополнительной форсажной турбины, рабочим телом которой является отработанный генераторный газ, отобранный после основной турбины ЖРД и сбрасываемый через сопло сброса. Основным преимуществом данной схемы является то, что форсирование двигателя не приводит к повышению параметров, негативно влияющих на работу двигателя (в том числе температуры генераторного газа).

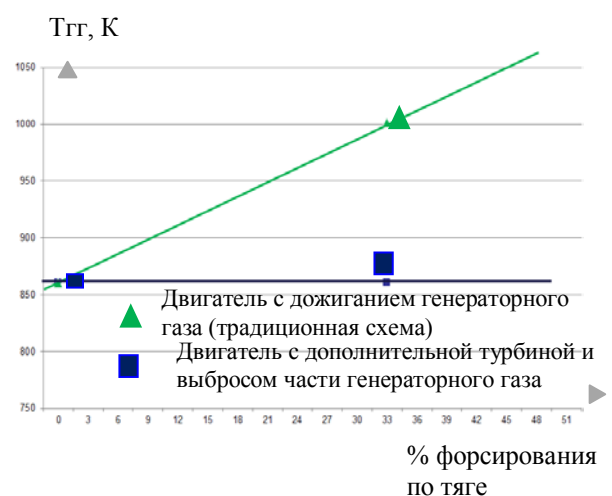


Рис. 2. Изменение температуры генераторного газа ($T_{гг}$) при форсировании двигателей

На рис. 2 показаны графики изменения температуры генераторного газа при форсиро-

вании ЖРД, выполненного по классической схеме, и ЖРД с форсажной турбиной. Повышение температуры генераторного газа при форсировании – основная причина, по которой современные ракетные двигатели не могут работать продолжительное время на форсажном режиме.

В ходе опытно-конструкторских работ были рассмотрены различные варианты использования топливных пар и установлено, что для реализации схемы наиболее подходящими являются пары O_2 +керосин и O_2 +сжиженный природный газ (СПГ). Целесообразно использование топливной пары O_2 +СПГ, это позволит повысить удельный импульс тяги инновационного двигателя и снизить стоимость топлива при незначительном изменении плотности горючего по сравнению с керосином, что более подробно рассмотрено в [6] и [7].

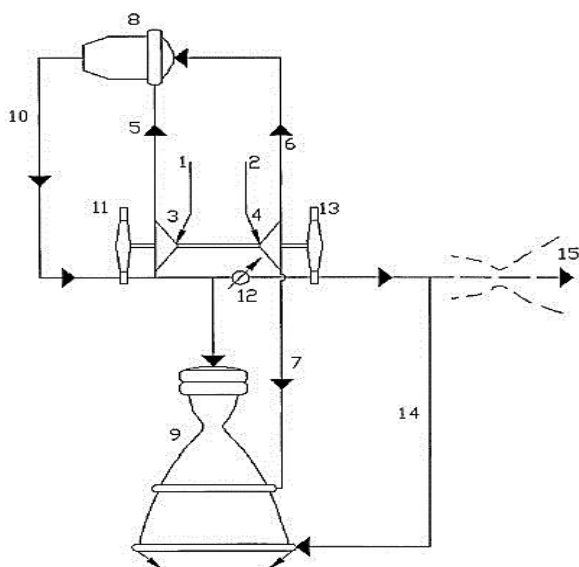


Рис. 3. Упрощенная схема инновационного ЖРД с форсажной турбиной

На рис. 3 обозначено: 1, 2 - магистрали подвода компонентов топлива к насосам; 3, 4 - насосы; 5, 6 - магистрали отвода компонентов топлива после насосов; 7 - магистраль подвода охладителя в рубашку охлаждения камеры; 8 - газогенератор; 9 - камера; 10 - магистраль подвода газа на основную турбину; 11 - основная турбина; 12 - система регулирования; 13 - дополнительная турбина; 14 - магистраль подвода газа в коллектор сопла камеры; 15 - сопло сброса газа [5].

Из результатов расчёта, направив на дополнительную турбину около 5% от основного расхода, мы можем увеличить тягу до 140% от номинальной.

Однако из-за выброса дважды отработанного генераторного газа мы фактически теряем

эти 5%, что неизбежно ведёт к уменьшению удельного импульса тяги. Падение удельного импульса тяги в форсажном режиме в отличие от номинального увеличивается с ростом высоты полета РН. Эта схема имеет предназначение для работы на первой и второй ступени ракеты-носителя, что исключает ее использование в пустоте [8].

Более подробно результаты сравнительного расчета модельного ЖРД тягой 225 тс с форсажной турбиной и без неё представлены в табл. 2.

Таблица 2
Сравнение форсированного режима модельного ЖРД с форсажной турбиной и без.

Наименование параметра	Значение параметра		
	Двигатель без форсажной турбины		Двигатель с форсажной турбиной
	Номинальный режим	Форсированный режим	
Тяга, тс:			
- в пустоте	225,6	285,6	285,6
- на Земле	200	266	266
Удельный импульс тяги, кг·с/кг:			
- в пустоте	352,0	352,9	341,5
- на Земле	312,1	321,3	310,9
Давление в камере сгорания кгс/см ²	165	210	210
Температура генераторного газа, К	760	973	760

Далее были проведены более подробные расчеты сравнения форсированного и номинального режимов, которые приведены в табл. 3.

Таблица 3
Сравнение номинального и форсированного режимов модельного ЖРД с форсажной турбиной

Наименование параметра	Значение параметра	
	Номинальный режим	Форсированный режим
Тяга двигателя, тс:		
- в пустоте	331,1	461,9
- на Земле	300	424,9
Удельный импульс тяги двигателя, кгс·с/кг		
- в пустоте	353,5	343,7
- на Земле	318,4	315,5
Соотношение компонентов	3,4	3,25
Расход, кг/с топлива	942,4	1291,7
- горючего	728,33	1000,5
- окислителя	213,88	291,7

Продолжение табл. 3

Давление в камере, кг/см ²	175	245
Охладитель камеры	СПГ (Метан)	СПГ (Метан)
Расход компонента на охлаждение, кг/с	120	150
Параметры газа на входе в камеру: расход, кг/с	265,64	374,8
давление, кгс/см ²	191	270
температура, К	830	825
Расход на дополнительную турбину, кг/с	-	50,5

Из результатов расчетов видно, что данный способ форсирования по тяге целесообразно использовать на 1 и 2 ступенях РН, так как с ростом высоты падение удельного импульса на форсированном режиме становится все более серьезным, что мешает эффективному использованию на 3 ступени.

Выводы

1. Использование ЖРД с форсажной турбиной допускает возможность форсирования двигателя в полете до 140% без увеличения температуры генераторного газа, что позволяет ЖРД работать продолжительное время на форсажном режиме.

2. Данное схемное решение позволяет предусмотреть в РН «горячее резервирование» без увеличения количества двигателей в составе ступени, что существенно снизит показатель аварийности РН.

3. В случае отказа одного или даже нескольких двигателей остальные могут быть переведены в форсированный режим, что позволяет сохранить тягу блока РН в пределах величины, необходимой для выполнения задачи.

Литература

1. Линдел Д. Выйти из космоса: рейтинг аварийности ракет-носителей // Электронная газета РБК. [URL]: <https://www.rbc.ru/photoreport/05/12/2016/584533ac9a79475555bb4777>.
2. Губанов Б.И. Триумф и трагедия «Энергии». Размышления главного конструктора. Н. Новгород: Издательство Нижегородского института экономического развития, 1998. Т. 3. 320 с.
3. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. М.: Изд-во стандартов, 1989. 224 с.
4. Волков Е.Б., Судаков Р.С., Сырицын Т.А. Основы теории надежности ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1974.
5. Патент РФ № 2013135372/06, 26.07.2013 / Горохов В.Д. // Способ форсирования по тяге жидкостного ракетного двигателя и жидкостный ракетный двигатель. Патент России № 2532454. 2014. Бюл. № 31.
6. Перспективы использования компонентов топлива метан-кислород в жидкостных ракетных двигателях / А.Ю. Васянина, А.А. Тонких, Д.А. Савчин, Д.А. Ермоленко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. Т. 1. С. 121-123.
7. Разработка жидкостного ракетного двигателя на компонентах топлива сжиженный природный газ и кислород для многоразовой ракетно-космической системы / А.Ф. Ефимочкин, С.П. Хрисанфов, В.В. Голубятник, П.В. Кафарена, А.В. Елисеев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3(34). С. 253-258.
8. Любинецкий М.А. Перспективный способ форсирования ЖРД // Сборник трудов победителей конкурса на лучшую научную работу студентов и аспирантов ВГТУ. [URL]: <https://docplayer.ru/amp/41626018-Sbornik-trudov-pobediteley-konkursa-na-luchshuyu-nauchnuyu-rabotu-studentov-i-aspirantov-vgtu.html>

Поступила 29.05.2019; принята к публикации 05.08.2019

Информация об авторах

Горохов Виктор Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. (473) 263-41-47

Любинецкий Максим Андреевич – аспирант кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: norm_mail@mail.ru, тел. 8-952-544-87-68

Пономарев Алексей Александрович – аспирант кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: xaxol_san@mail.ru, тел. 8-920-432-41-01

USING LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINE WITH AN ADDITIONAL AFTERBURNER ON THE CARRIER ROCKET WITH THE POSSIBILITY OF REDUNDANCY

V.D. Gorokhov, M.A. Lyubinetskiy, A.A. Ponomarev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article presents the concept of an innovative liquid-propellant rocket engine with an additional afterburner introduced into the design of a turbopump unit. The use of this engine in the first and second stages of a carrier rocket will allow the implementation of a redundancy for a thrust. The relevance of the work is due to the high accident rate of carrier rockets in the world and in Russia in particular. The use of the liquid-propellant rocket engine construction considered in the article will make it possible to reduce this indicator to the lowest possible value and make Russian carrier rockets more competitive in the world market. In this work, the dependence of changes in engine reliability on the operating mode is considered, the results of a comparative analysis of LPRE reliability indicators when operating in conjunction of several engines are given, the parameters are calculated and a comparative analysis of the forced mode of the LPRE is given, performed according to the classical scheme with the forced mode of an innovative afterburner engine, the main advantages of the innovation scheme are shown. An assessment was made of the possibility of using an innovative engine for carrier rocket redundancy. The obtained results confirm the relevance of further development of this circuit design for realizing the possibility of hot redundancy of a CR for a long time

Key words: liquid rocket engine, turbine, reliability, redundancy, afterburner

References

1. Lindel D. "To escape from space: rating of missile launch accidents", *Electronic Newspaper RBC*, available at: <https://www.rbc.ru/photoreport/05/12/2016/584533ac9a79475555bb4777>.
2. Gubanov B.I. "Triumph and tragedy of the "Energy". Reflections of the chief constructor" ("Triumf i tragediya «Energii». Razmyshleniya glavnogo konstruktora"), Publishing House of Nizhny Novgorod Institute of Economic Development, 1998, vol. 3, 320 p.
3. Kubarev A.I. "Reliability in mechanical engineering" ("Nadezhnost' v mashinostroyenii"), Moscow, Publishing House of Standards, 1989, 224 p.
4. Volkov E.B., Sudakov R.S., Syritsyn T.A. "Fundamentals of the theory of reliability of rocket engines" ("Osnovy teorii nadezhnosti raketnykh dvigateley"), Moscow, Mashinostroyeniye, 1974.
5. Gorokhov V.D. "A method of forcing the liquid rocket engine on the thrust and liquid rocket engine" ("Sposob forsirovaniya po tyage zhidkostnogo raketnogo dvigatelya i zhidkostnyy raketnyy dvigatel"), patent of Russia no. 2532454, 2014, bull. no. 31.
6. Vasyanina A.Yu., Tonkikh A.A., Savchin D.A., Ermolenko D.A. "Prospects for the use of methane-oxygen fuel components in liquid rocket engines", *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics (Aktual'nye Problemy Aviatsii i Kosmonavtiki)*, 2017, vol. 1, pp. 121-123.
7. Efimochkin A.F., Khrisanfov S.P., Golubyatnik V.V., Kafarena P.V., Eliseev A.V. "Development of a liquid propellant rocket engine using liquefied natural gas and oxygen components for a reusable rocket-space system", *Bulletin of the Samara State Aerospace University (Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta)*, 2012, no. 3 (34), pp. 253-258.
8. Lyubinetsky M.A. "A promising method of forcing a LPRE", Collection of works of winners of the competition for the best scientific work of undergraduate and graduate students of VSTU, available at: <https://docplayer.ru/amp/41626018-Sbornik-trudov-pobediteley-konkursa-na-luchshuyu-nauchnuyu-rabotu-studentov-i-aspirantov-vgtu.html>.

Submitted 29.05.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Viktor D. Gorokhov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Voronezh, Russia), tel. (473) 263-41-47

Maksim A. Lyubinetskiy, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Voronezh, Russia), e-mail: norm_mail@mail.ru, tel. 8-952-544-87-68

Aleksey A. Ponomarev, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Voronezh, Russia) e-mail: xaxol_san@mail.ru, tel. 8-920-432-41-01

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИБКОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

В.И. Максименков¹, М.В. Молод¹, В.И. Федосеев²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Филиал ПАО «Корпорация «Иркут», г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрен процесс формообразования труб с помощью наполнителя. Предложен наполнитель в виде гибкой оправки, обеспечивающий создание внутреннего давления на стенки трубы, что исключает появление браковочных признаков. Давление на внутренние стенки трубы может меняться при изменении радиусагиба трубы и угла клиньев оправки. Основные материалы, применяемые для формообразования труб, – алюминиевые и титановые сплавы, нержавеющие стали. Сформулированы методы изготовления труб. Цель работы – повышение качества получаемых труб. Рассмотрен процесс формообразования труб. При этом гибкую оправку помещают внутрь трубы. Гибкая оправка содержит две тяги с нанизанными на них клиньями, которые обеспечивают взаимодействие с разрезными кольцами в противоположных направлениях относительно средней части трубы. Кольца могут изменять свой диаметр, подкрепляя внутреннюю поверхность трубы. При формообразовании трубы увеличивается давление на ее стенки за счет изменения радиуса изгиба и изменения длины наружного слоя. Гибкая оправка обеспечивает повышение устойчивости трубы к возникновению складок и искажению ее геометрической формы от исходной по ее сечению. Заданы параметры трубной заготовки. Выполнены расчеты величины давления разрезного кольца на трубу q_n с учетом механических и геометрических параметров трубной заготовки. Основным условием процесса формообразования трубной заготовки, обеспечивающим качественное получение детали и исключающим появление браковочных признаков, является выполнение условия $q_n \leq q_v$

Ключевые слова: формообразование трубы, гибкая оправка, браковочные признаки, разрезное кольцо, клинья, гибкие тяги

Введение

В конструкциях летательных аппаратов широкое применение находят трубы. Так, в топливных, гидравлических, пожарных системах самолета применяются трубы различных геометрических параметров.

Основные материалы, применяемые для изготовления труб – алюминиевые, титановые сплавы, нержавеющие стали.

С учетом различных типоразмеров труб методы их формообразования можно разделить на следующие: гибка вручную, гибка в штампах, гибка на специализированных станках, гибка на оборудовании с ЧПУ.

Выбор метода изготовления труб определяется геометрическими параметрами труб, маркой материала и производственной программой по выпуску изделия.

В процессе гибки труб возможно появление браковочных признаков (рис. 1).

Характер распределения деформаций и напряжений при изгибе трубы приведен в работах [1], [2].

Наполнитель жесткий и эластичный, используемый в процессе изгиба заготовки, вы-

полняется с учетом параметров оборудования для изготовления трубы.

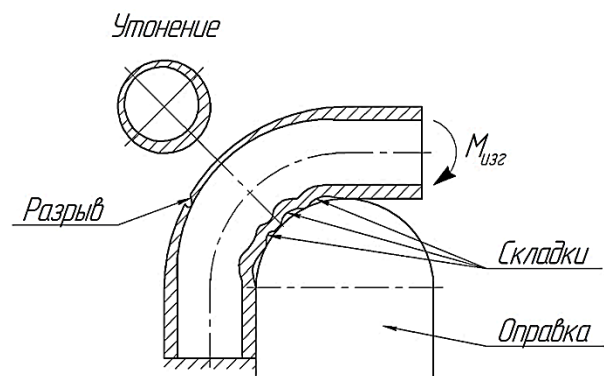


Рис. 1. Браковочные признаки

Постановка задачи

Задача, поставленная в статье, – разработать конструкцию гибкого наполнителя, который позволяет осуществлять регулирование величины внутреннего давления на трубу в процессе ее изгиба, изменение механических свойств заготовки.

Цель работы – разработка конструкции гибкого наполнителя, позволяющего повысить качество изготовления труб, исключить браковочные признаки.

Конструктивные особенности гибкого наполнителя

Наполнитель выполнен в виде гибкой оправки (рис. 2, 3) [3].

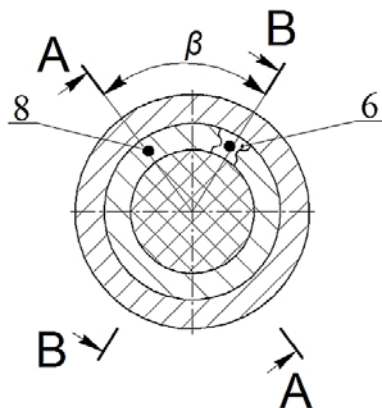


Рис. 2. Поперечное сечение трубы

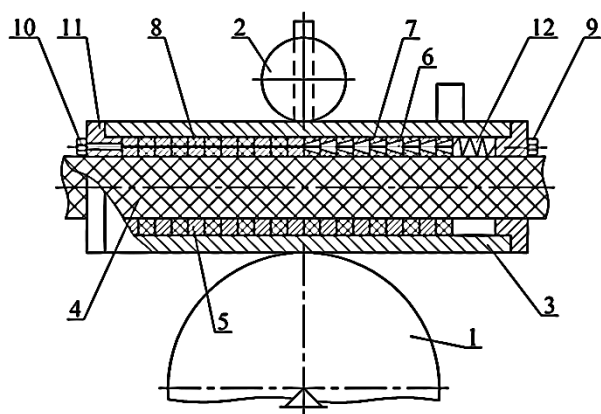


Рис. 3. Продольное сечение трубы: 1 – пуансон; 2 – обкатной ролик; 3 – труба; 4 – эластичный стержень; 5 – разрезное кольцо; 6 – клин; 7 – резиновое кольцо; 8 – гибкая тяга; 9 – гайка; 10 – болт; 11 – крышка; 12 – пружина

Процесс изгиба трубы осуществляется следующим образом.

Перед изгибом трубы наполнитель в виде гибкой оправки [3] устанавливается внутри трубы 3.

При перемещении обкатного ролика 2 начинается изгиб трубы. При этом удлиняется наружная поверхность трубы и гибкие тяги 7, перемещаясь вместе с клиньями 8, взаимодействуют с разрезными кольцами 5 и изменяют их диаметр. При этом повышается давление на внутреннюю поверхность трубы. Процесс формообразования завершается после изгиба трубы на заданный радиус, определяемый пуансоном 1.

Гибкая оправка содержит две тяги, соединенные с клиньями (рис. 3), которые обеспечивают взаимодействие с разрезными кольцами в противоположных направлениях относительно средней части трубы. Разрезное кольцо 5 с клином 6 показано на рис. 4.

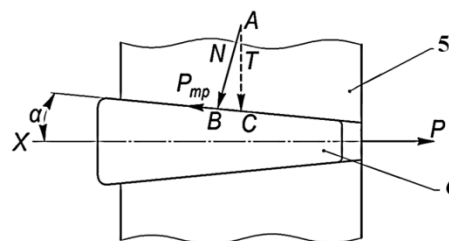


Рис. 4

Описанный выше процесс обеспечивает повышение устойчивости трубы к образованию складок и искажению геометрической формы от исходной по ее сечению. Давление на трубу можно регулировать посредством варьирования элементами оправки.

Расчет параметров процесса изгиба трубы с гибким наполнителем

Разработана программа, позволяющая моделировать процесс изменения удельного давления на внутреннюю поверхность трубы q_v в процессе ее изгиба с учетом параметров гибкой оправки.

Характер изменения деформаций при изгибе трубы $R_{изг}$ приведен на рис. 5.

Параметры процесса формообразования трубы с применением гибкого наполнителя определяются из уравнения равновесия на ось X (рис. 4), имеем (1):

$$P - 2N \sin \alpha - 2P_{тр} \cdot \cos \alpha = 0, \quad (1)$$

где $P_{тр}$ – усилие трения, вычисляется (2):

$$P_{тр} = M_k \cdot N, \quad (2)$$

где N – усилие, нормальное к поверхности скольжения, определяется (3):

$$N = P / (2(\sin \alpha + M_k \cdot \cos \alpha)), \quad (3)$$

где M_k – коэффициент трения;

α – угол наклона клина.

Давление разрезного кольца на трубу q_v определяется (4):

$$q_v = (t \cdot \sigma_k) / R_k, \quad (4)$$

где t – толщина разрезного кольца, см;

R_k – радиус разрезного кольца, см;

σ_k – напряжение в разрезном кольце:

$$\sigma_k = N / (F \cdot \cos \alpha), \quad (5)$$

где F – площадь поперечного сечения разрезного кольца, см²;

α – угол наклона клина, град.

Тогда, подставив значение (5) в (4) с учетом (3), получим (6):

$$q_v = (t \cdot P) / (2(\sin \alpha + M_k \cdot \cos \alpha) R_k \cdot F \cdot \cos \alpha). \quad (6)$$

Давление трубы на разрезные кольца вычисляется (7):

$$q_n = (t_1 \cdot \sigma_1) / R_{изг}, \quad (7)$$

где t_1 – толщина стенки трубы;

σ_1 – напряжения в зоне изгиба трубы;

$R_{изг}$ – радиус изгиба трубы.

Усилие натяжения гибких тяг определяется (8):

$$P = 2N(\sin \alpha + M_k \cdot \cos \alpha). \quad (8)$$

Напряжение в разрезном кольце при максимальном значении упругих деформаций определяется (9):

$$\sigma_k = E \cdot \varepsilon, \quad (9)$$

где E – модуль упругости разрезного кольца, $E = 20700 \text{ кг/см}^2$;

ε – упругая деформация, $\varepsilon = 0,06$.

Усилие T , действующее в разрезном кольце 5 на клин 10 в направлении АС, равно (10):

$$T = \sigma_k \cdot F \quad (10)$$

Параметры гибкой оправки и выполненные расчеты приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Параметры трубы и гибкой оправки

№ п/п	Параметры	Значения
1	Наружный диаметр трубы, мм	32
2	Толщина стенки трубы t , мм	2
3	Радиус изгиба трубы $R_{изг}$, мм	150
4	Длина изгибаемой части, мм	450
6	Угол наклона разрезного кольца α , °	34
7	Коэффициент трения M_k	0,2
8	Площадь разрезного кольца F , см^2	0,12

Таблица 2

Расчетные данные

№ п/п	Параметры	Значения
1	Напряжение в разрезном кольце σ_k , МПа	124
2	Усилие, действующее в разрезном кольце T , кгс	124
3	Давление разрезного кольца на трубу q_v , МПа	3,9
4	Давление трубы на разрезные кольца q_n , МПа	1,7

Основным условием процесса формообразования, обеспечивающего качественное полу-

чение детали и исключение браковочных признаков при выполнении условия (рис. 5):

$$q_n \leq q_v$$

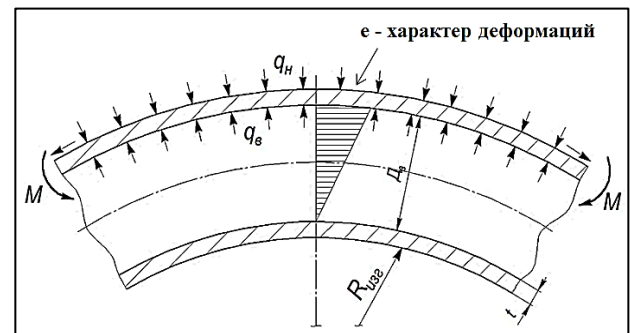


Рис. 5. Схема процесса формообразования трубы

Образец трубы из АМГ-2М, полученный изгибом, представлен на рис. 6.



Рис. 6. Образец трубы

Выводы

1. Разработана гибкая оправка для формообразования труб, обеспечивающая регулирование давления внутри трубы и позволяющая исключить появление браковочных признаков.

2. Получены зависимости и выполнены расчеты параметров процесса формообразования трубы на заданный радиус кривизны, которые распространяются на заготовки из металлических материалов с различными геометрическими размерами.

3. Проведены экспериментальные исследования по формообразованию труб, подтверждающие работоспособность конструктивного решения и возможность использования его для различных деталей из трубных заготовок.

Проведенный анализ метода изготовления труб показывает, что его целесообразно при-

менять для формообразования коротких труб длиной до 1000 мм, при этом диаметр заготовок колеблется от 20 до 80 мм.

Литература

1. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве летательных аппаратов. М.: Машиностроение. 1970. С. 351.
2. Гольперин А.И. Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопроводов. М.:

Наука, 1983. С. 203.

3. Пат. 2201308 Российская Федерация. Способ гибки труб и устройство для его осуществления / Максименков В.И., Одинг С.С., Клименков А.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-исследовательский институт автоматизированных средств производства и контроля", Общество с ограниченной ответственностью "Центр программного управления "Тест". № 2000115072/02; заявл. 09.06.2000; опубл. 27.03.2003.

Поступила 02.06.2019; принята к публикации 05.08.2019

Информация об авторах

Максименков Владимир Иванович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Молод Марина Владиславовна - д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: molodmv@yandex.ru

Федосеев Владислав Игоревич - инженер-конструктор, филиал ПАО «Корпорация «Иркут» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: vladislav.f@inbox.ru

FORMATION OF PIPES WITH THE APPLICATION OF THE FLEXIBLE FILLER

V.I. Maksimenkov¹, M.V. Molod¹, V.I. Fedoseev²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²PJSC "Corporation "Irkut", Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses questions of forming pipes using filling. A filler in the form of a flexible mandrel is proposed, which ensures the creation of internal pressure on the pipe walls, which excludes the appearance of rejection signs. The pressure on the inner wall of the pipe can vary with the change of the bending radius of the pipe and the angle of the wedges of the mandrel. The main materials used for forming pipes are aluminum and titanium alloys, stainless steels. Methods for the manufacture of pipes are formulated. The purpose of the work is to improve the quality of the pipes produced. The process of forming pipes is considered. At the same time, this flexible mandrel is placed inside the pipe. The flexible mandrel contains two rods with wedges strung on them, which provide interaction with split rings in opposite directions relative to the middle part of the pipe. Rings can change their diameter, reinforcing the inner surface of the pipe. When forming a pipe, pressure on its walls increases due to a change in the bend radius and a change in the length of the outer layer. A flexible mandrel provides increased resistance of the pipe to the occurrence of folds and distortion of its geometric shape from the original in its cross section. The parameters of the pipe billet are given. Calculations were made of the pressure of the split ring on the pipe q_{in} , taking into account the mechanical and geometrical parameters of the tubular billet. The main condition of the process of forming tubular billet, providing quality parts, and excluding the appearance of rejection signs, is the condition $q_{out} \leq q_{in}$

Key words: pipe forming, flexible mandrel, rejection sign, split ring, wedges, flexible pulls

References

1. Gorbunov M.N. "Technology of procurement and stamping works in the production of aircraft" ("Tekhnologiya zagotovitel'no-shtampovochnykh rabot v proizvodstve letatel'nykh apparatov"), Moscow, mashinostroenie, 1970, 351 p.
2. Gol'perin A.I. "Machines and equipment for the production of curved sections of pipelines" ("Mashiny i oborudovanie dlya izgotovleniya krivolineynykh uchastkov truboprovodov"), Moscow, nauka, 1983, 203 p.
3. Maksimenkov V.I., Oding S.S., Klimenkov A.N. "Method of pipe bending and device for its implementation" ("Sposob gibki trub i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya"), patent 2201308 of RF, publ. 27.03.2003.

Submitted 02.06.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Vladimir I. Maksimenkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026 Russia) e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Marina V. Molod, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026 Russia), e-mail: molodmv@yandex.ru

Vladislav I. Fedoseev, Engineering Designer, Public company «Corporation «Irkut» (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: vladislav.f@inbox.ru

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В.Э. Парфенов, А.В. Хандожко

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

Аннотация: проанализированы методы упрочнения поверхностей с использованием ударного воздействия, существующие конструкции устройств для реализации этих методов, рассмотрены возможности применения таких технологий при изготовлении специальных деталей. Рассмотрены общие конструктивные решения устройств ударного упрочнения применительно к волновому деформационному упрочнению, а также конструкции генераторов ударных импульсов для этих устройств, использующие для формирования удара различные принципы: за счет пневмо- или гидропривода, при помощи кривошипно-шатунного механизма, а также электромагнитной пульсации. Проанализированы достоинства и недостатки этих конструкций с точки зрения возможности и удобства встраивания такого инструмента в состав технологического оборудования, управляемости процессом, а также основных характеристик ударных систем: энергии единичного удара, частоты ударов, КПД, габаритных размеров и др. На основе проведенного анализа сформулирован ряд рекомендаций по выбору типа генератора ударных импульсов для различных технологических задач, выявлены ограничения и области рационального использования таких генераторов, в том числе с учетом вида обработки и требований к технологическому оборудованию. Полученная гистограмма зависимости энергии удара от частоты для различных типов генераторов подтверждает и наглядно демонстрирует выводы об областях применения различных генераторов ударных импульсов

Ключевые слова: генератор ударных импульсов, методы отделочно-упрочняющей обработки, упрочнение металлов поверхностно-пластическим деформированием, ударный инструмент, машины ударного действия

Введение

Одним из эффективных способов упрочнения деталей является упрочнение поверхностно-пластическим деформированием (ППД). Обработка ППД позволяет управлять микрогеометрией поверхности, а также физико-механическими свойствами. Среди большого разнообразия способов реализации упрочнения ППД выделяется группа ударных методов (обдужка дробью, микрошариками, центробежная обработка, чеканка и т.п.). Для этой разновидности упрочняющей обработки характерно ударное воздействие инструмента на поверхность детали. При ударе обеспечивается глубокое проникновение деформационного воздействия при минимальных статических нагрузках. В связи с этим данный метод применим для обработки нежестких изделий, для которых статические методы упрочнения ППД (накатывание роликом или шариком) непригодны. Кроме этого, при необходимых параметрах ударного воздействия возможно упрочнение на значительную глубину (десятки миллиметров) [1, 2]. Таким образом, ударные методы могут быть реализованы как отделочная обработка или упрочняющая. Данная технология может быть интересна как самостоятельная, так и как

дополнение аддитивных технологий металлических изделий. Изделий из металла этим способом делают относительно немного, особенно при высоких требованиях к качеству материала. Проблема заключается в высокой дефектности, особенно пористости, спекаемых (наплавляемых) слоев. Пластическое деформирование в данном случае может играть положительную роль с точки зрения обеспечения качества материала.

В плане управляемости процессом, механизации, возможности обработки сложных поверхностей, преимущества имеют методы на основе чеканки. Одной из наиболее интересных вариаций является статико-импульсная и волновая деформационная обработка (ВДУ).

В этих технологиях специальным образом настраиваются параметры удара так, чтобы воздействие было растянуто во времени [3]. Это обеспечивает высокую эффективность процесса. Данная технология прошла научную апробацию, реализована на лабораторных и специальных установках. Генератор импульсов создает ударную волну, которая через волновод и боек передается на поверхность детали. Изменение характеристик ударной волны обеспечивает заданную степень и глубину упрочнения поверхностного слоя. Управление этими характеристиками возможно путем изменения широкого круга за счет варьирования большого чис-

ла параметров: способа передачи энергии бойку, энергии среды, геометрических, механических характеристик бойка и волновода и др. Однако промышленное внедрение таких технологий сдерживается отсутствием серийного оборудования, инструментов и их важнейшей составляющей - генераторов ударных импульсов. Генератор импульсов является наиболее сложной и ответственной частью упрочняющего инструмента. Поскольку инструмент для ВДУ должен эксплуатироваться в составе технологического оборудования, кроме энергетических характеристик для конструкции большое значение имеют габариты, масса, возможность работы в различных пространственных положениях, надежность и безопасность. Все эти критерии необходимо рассматривать при анализе и выборе генератора импульсов для упрочняющей обработки. Как показала практика, в конструкциях инструментов для волнового ударного упрочнения могут быть использованы генераторы импульсов, широко применяемые в инструментах для различных областей – строительство, слесарные и кузнечные работы.

Анализ принципиальных конструкторских решений генераторов импульсов

Существуют несколько принципиальных конструкторских решений генераторов ударных импульсов. Энергия удара может создаваться за счет пневмо- или гидропривода, кулачковых механизмов, а также электромагнитной пульсации, позволяющих производить

упрочнение с высокой энергией удара и частотой [4]. Как правило, генераторы импульсов имеют дополнительные элементы в ударной системе, что позволяет управлять параметрами единичного ударного воздействия.

На этих принципах созданы и промышленно выпускаются различные ручные и механизированные устройства и инструменты, которые могут быть аналогами необходимых генераторов или же генераторы могут быть созданы на базе этих устройств (инструментов).

Основными характеристиками ударных систем являются энергия единичного удара, частота ударов, КПД, габаритные размеры, масса и металлоемкость.

Широкое распространение на практике получили инструменты с ударными генераторами, использующими энергию сжатого воздуха. Такие генераторы используются в частности в ударных пневмоинструментах: отбойные, рубильные, клепальные молотки и т.п.

Как правило, пневматические генераторы импульсов работают на частоте, определяемой динамическими характеристиками ударной системы. Сжатый воздух поочередно попадает в нижнюю или верхнюю полости пневмоцилиндра, при этом переключение направления движения воздуха осуществляется самим ударником, который перекрывает соответствующие каналы. Система управления генератора практически отсутствует. Управлять частотой ударов можно в очень ограниченном диапазоне, меняя давление воздуха, массу и размеры деталей ударной системы (рис. 1).

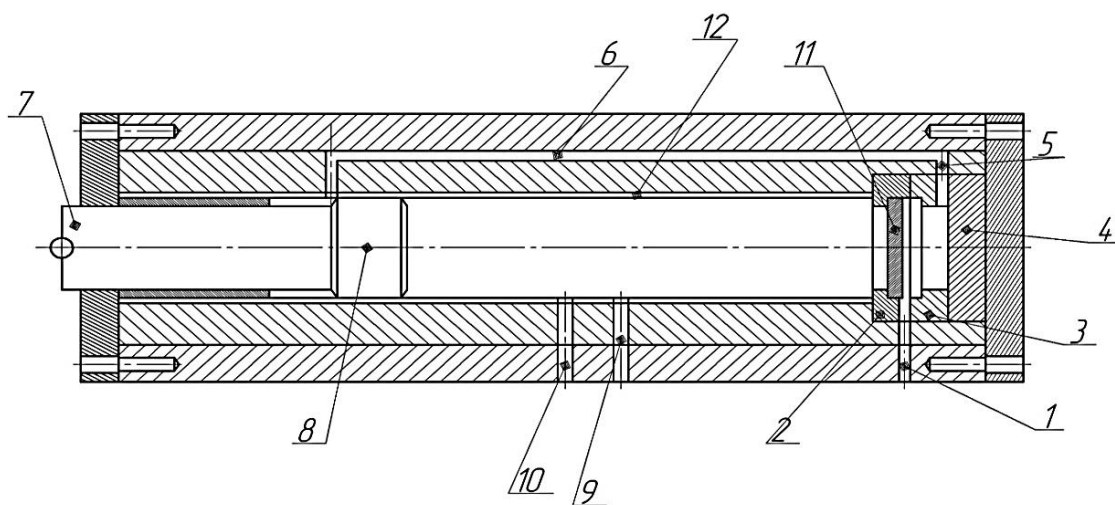


Рис. 1. Принципиальная схема пневматического генератора импульсов: 1 – канал подачи воздуха; 2, 3, 4 – клапанная коробка, образуемая тремя кольцами; 5, 6 – канал для подвода воздуха в полость под ударником; 7 – волновод; 8 – ударник; 9, 10 – каналы отвода воздуха в атмосферу; 11 – клапан; 12 – гильза

В частности, по такой схеме работает популярный отечественный генератор ударных импульсов модели МОП-3, обладающий следующими техническими характеристиками: энергия удара $A=44$ Дж, частота ударов $f=20,5$ Гц, масса $m=7,8$ кг относительная металлоемкость $0,18$ кг/Дж.

Достоинством пневмогенераторов является простота конструкции, пневматической системы. Соответственно, такие инструменты ремонтпригодны, относительно дешевы, надежны.

Главным недостатком пневматических ударных генераторов является ограниченность возможности управления режимами. Частота и энергия отдельного импульса может меняться в узком диапазоне. Кроме этого, для пневмогенераторов характерна невысокая абсолютная и относительная энергия удара, а также сравнительно низкий КПД. Например, для пневматического отбойного молотка КПД составляет $8...12\%$. Еще одним недостатком является необходимость подключения к центральной пневматической системе или автономному компрессору высокой производительности. Проблемы создает высокий уровень шума при работе пневматического инструмента.

Инструменты волнового деформационного упрочнения на базе пневмогенератора можно рекомендовать для отделочно-упрочняющей

обработки нежестких деталей, термомеханического упрочнения, в том числе при реализации аддитивных технологий для серийного и крупносерийного производства. В этом случае параметры инструмента настраиваются под конкретную деталь и перестраиваются крайне редко.

Гидравлические ударные системы являются наиболее мощными. В качестве источника энергии используется жидкость под давлением. Более высокие давления, несжимаемость рабочего тела обеспечивают стабильные характеристики процесса упрочнения. Кроме того, такие генераторы обеспечивают хорошее управление частотой и энергией единичного удара.

Гидравлические генераторы импульсов используются в горной и дорожной технике в ударных механизмах (гидромолотах). Имеется большое число конструктивных решений, в том числе с применением пневматических аккумуляторов. Один из возможных вариантов представлен на рис 2.

Важной особенностью этого генератора является возможность независимого регулирования частоты и энергии ударов. Он обладает следующими техническими характеристиками: энергия удара $A=60...300$ Дж; частота ударов $f=3...40$ Гц; металлоемкость $0,3$ кг/Дж, масса $m=90$ кг [2].

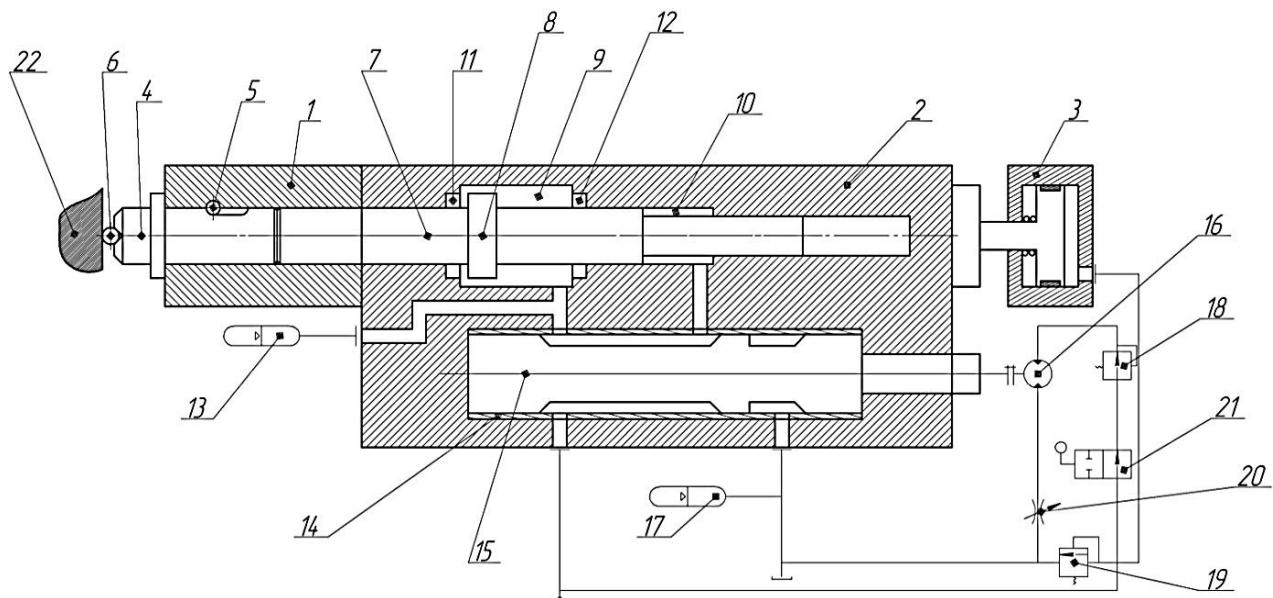


Рис. 2. Гидравлическая схема генератора импульсов: 1 – корпус; 2 – цилиндр; 3 – гидроцилиндр; 4 – волновод; 5 – штифт; 6 – инструмент; 7 – боек; 8 – тормозная шейка; 9 – взводящая (штоковая) полость; 10 – разгонная (поршневая) полость; 11 – тормозная камера; 12 – тормозная камера; 13 – гидропневмоаккумулятор; 14 – гильза; 15 – золотник; 16 – гидродвигатель; 17 – гидропневмоаккумулятор; 18 – редукционный клапан; 19 – переливной клапан; 20 – дроссель; 21 – распределитель; 22 – заготовка

Гидравлические генераторы имеют высокий КПД – 75% и выше, с их помощью удается реализовывать разнообразные варианты упрочнения (волновое, статико-импульсное и др.).

Главным недостатком гидравлических генераторов является сложная конструкция, включающая большое число точных деталей, что снижает надежность устройств на его основе. Такие генераторы работают при относительно высоких давлениях рабочей жидкости, что требует решения задач герметизации деталей и узлов. Кроме того, инструмент требует наличия технологического оборудования насосной станции и относительно сложной системы управления. Жесткие подводящие шланги затрудняют монтаж инструмента на технологическом оборудовании.

При применении гидравлического генератора ударных импульсов для упрочнения специальных деталей в качестве дополнения к аддитивной технологии выращивания металлических изделий, наличие вблизи рабочей зоны шлангов подачи масла под давление осложняет обеспечение безопасности выполняемых работ.

Инструменты на базе гидравлического генератора импульсов эффективны при реализации технологий, требующих большой глубины упрочненного слоя и степени упрочнения в мелкосерийном и серийном производстве. Как правило, такая обработка является только упрочняющей.

Меньшее распространение получили электромагнитные генераторы импульсов. Их работа основана на втягивании и выталкивании якоря в катушке электромагнитов. Якорь в таких машинах ударного действия является бойком. На практике такие генераторы нашли ограниченное применение в перфораторах невысокой мощности.

Принципиальная схема работы электромагнитных генераторов импульсов представлена на рис. 3. В качестве примера приведем электромагнитный генератор ударных импульсов ИЭ-4207Б, который обладает следующими техническими характеристиками: энергия удара $A=4,8$ Дж, частота ударов $f=50$ Гц, металлоемкость $1,4$ кг/Дж, масса $m=6,9$ кг.

Электромагнитные генераторы просты и обеспечивают управление частотой импульсов за счет изменения частоты питающего тока. В небольшом диапазоне возможно изменение энергии единичного импульса за счет силы тока.

Управляемые электромагнитные генераторы необходимо запитывать через специальные

источники, обеспечивающие управление током и напряжением, в том числе через систему ЧПУ.

Главным недостатком такого генератора является относительно небольшая энергия единичного импульса.

Кроме этого, КПД таких ударных машин составляет 30...40%, а из-за потерь наблюдается интенсивный разогрев катушек. При продолжительном цикле обработки генератор требует принудительного охлаждения и соответствующего усложнения конструкции.

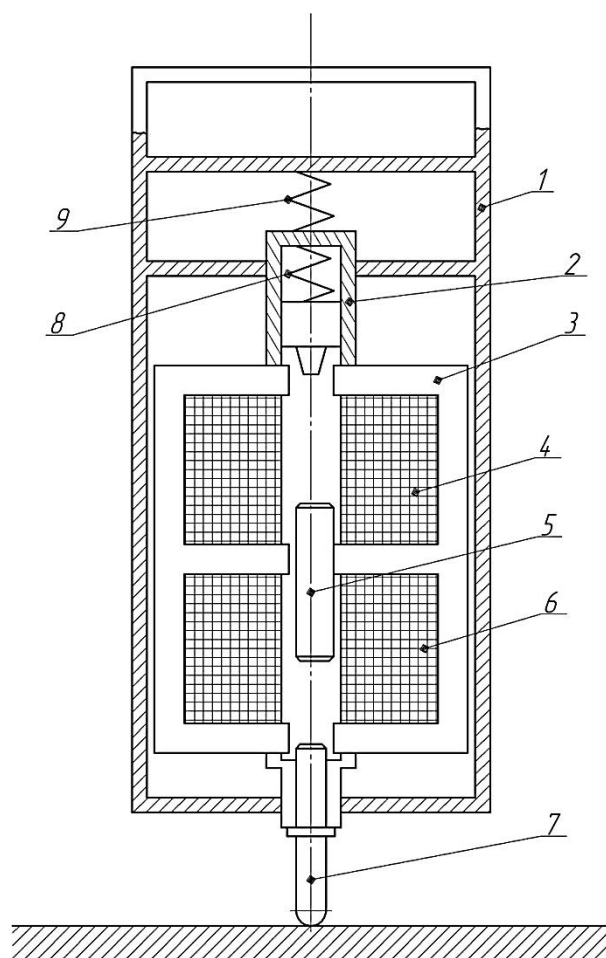


Рис. 3. Принципиальная схема электромагнитного генератора импульсов: 1 — корпус; 2 — буфер; 3 — магнитопровод; 4 — электромагнитная катушка обратного хода; 5 — ударник; 6 — электромагнитная катушка прямого хода; 7 — рабочий инструмент, 8 — пружина буфера; 9 — пружина эластичной подвески ударного узла

Достоинствами электромагнитных генераторов является простота, удобство эксплуатации, простое управление. Инструменты с таким генератором легко встраиваются в технологическое оборудование, не требуя больших изменений электрической схемы.

Рациональной областью применения таких инструментов является отделочная, в меньшей степени отделочно-упрочняющая обработка нежестких деталей, а также термомеханическая обработка для аддитивных технологий [5].

Широкое распространение получили электромеханические генераторы импульсов. Принципиальная схема работы подобных генераторов представлена на рис. 4.

Принцип действия таких генераторов основан на преобразовании вращательного движения вала электродвигателя через кривошипно-шатунный механизм в поступательное движение поршня. В свою очередь, поршень приводит в движение ударник, который бьет по инструменту.

По такому принципу работает, например, генератор ударных импульсов модели Калибр Мастер ОМ-1700/30М, обладающий следующими техническими характеристиками: энергия удара $A=65$ Дж, частота ударов $f=33,5$ Гц, металлоемкость $0,6$ кг/Дж, масса $m=23,7$ кг.

Энергия удара таких устройств может достигать 70 Дж, а частота ударов – 50 Гц. Изменяя скорость вращения вала электродвигателя, существует возможность регулировать частоту ударов.

Электромеханические генераторы импульсов относительно легко встраиваются в оборудование, основной сложностью являются существенные габаритные размеры. В конструкцию подобных генераторов входит большое число высокоточных деталей, что суще-

ственно усложняет их изготовление. КПД таких ударных машин сравнительно высок – 40% и выше.

Рациональной областью использования таких инструментов является упрочняющая, в меньшей мере отделочно-упрочняющая обработка.

На рис. 5 показаны ориентировочные энергетические характеристики ударных генераторов различного принципа действия.

Полученная гистограмма подтверждает выводы об областях применения различных генераторов ударных импульсов. Для упрочняющей обработки наиболее эффективны гидравлические генераторы импульсов, в ряде случаев для этой цели можно рекомендовать электромеханические или пневматические ударные инструменты. При отделочно-упрочняющей и отделочной обработке рационально применение как электромеханических, электромагнитных, так и пневматических инструментов.

С точки зрения удобства встраивания в технологическое оборудование, реализующего аддитивные технологии, лучшие характеристики имеют инструменты с электромагнитным генератором. Они имеют минимальные габариты, легко регулируются и подключаются к системам ЧПУ. Энергия единичного удара таких инструментов вполне достаточна для термомеханической обработки и ВДУ нежестких деталей, которые характерны для получения аддитивными технологиями.

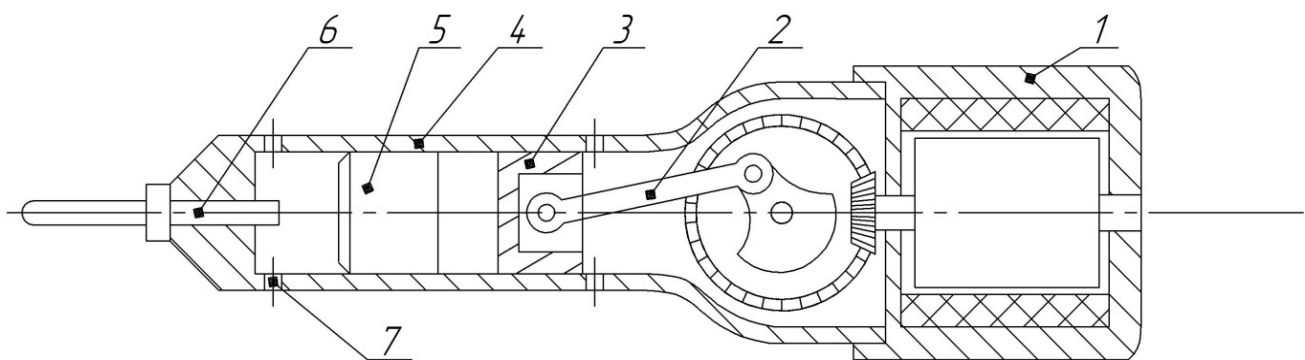


Рис. 4. Принципиальная схема электромеханического генератора импульсов: 1 – электродвигатель; 2 – шатун; 3 – поршень; 4 – цилиндр; 5 – ударник; 6 – волновод; 7 – отверстие в цилиндре

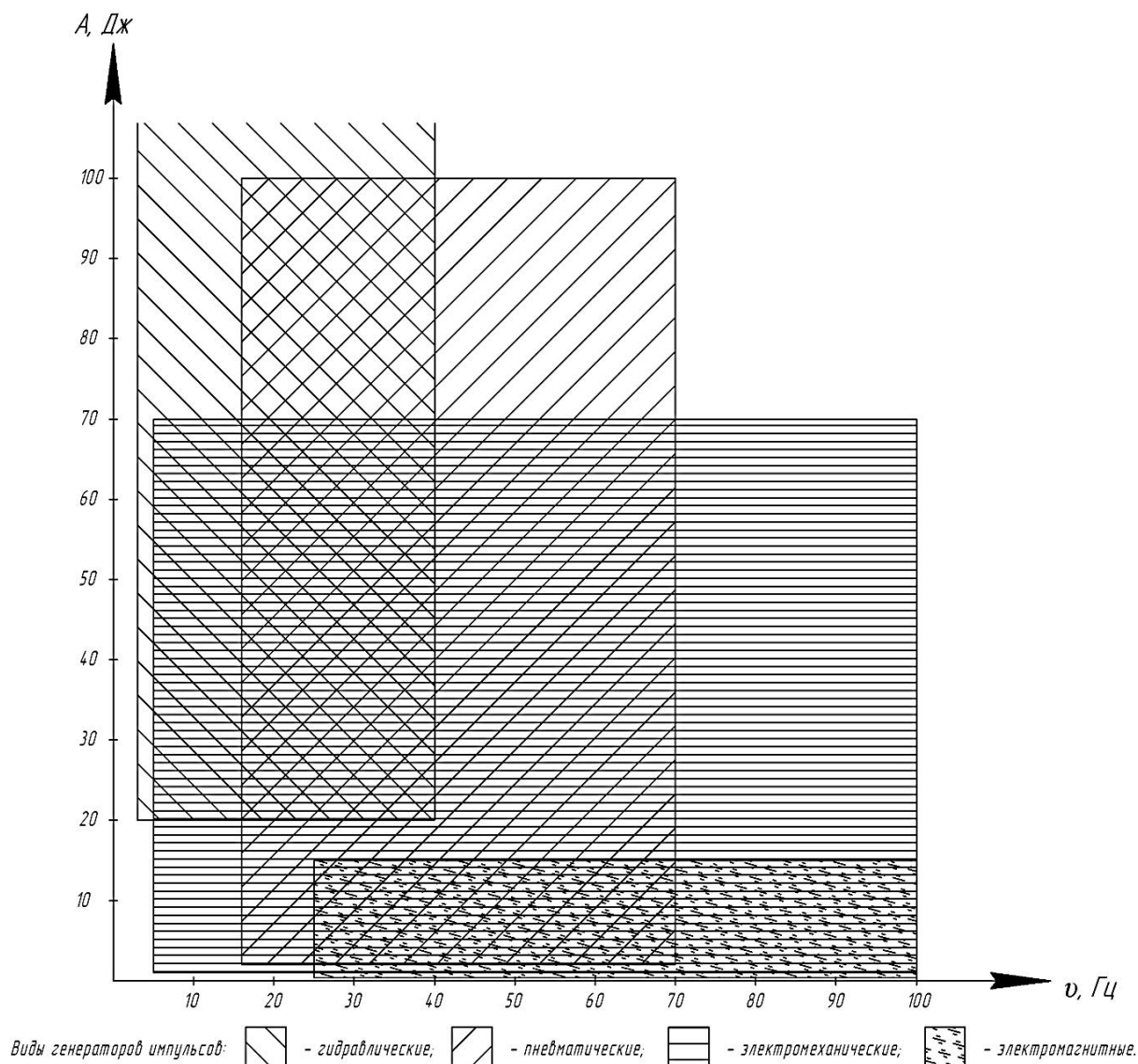


Рис. 5. Энергетические характеристики ударных генераторов различного принципа действия

Заключение

Проведенный анализ позволил сформировать общие рекомендации для выбора типа генератора ударных импульсов при реализации технологии ВДУ. Выявлены ограничения и области рационального использования таких генераторов, в том числе с учетом вида обработки и требований к технологическому оборудованию. При выборе типа генератора для инструмента ВДУ следует учитывать жесткость детали, требования к параметрам упрочнения, шероховатости упрочняемых поверхностей, а также серийность производства и ограничения технологического оборудования.

Литература

1. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
2. Механика нагружения поверхности волной деформации / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов, Д.Л. Соловьев. М.: Машиностроение-1, 2005. 149 с.
3. Информационно-аналитическое обеспечение упрочнения статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Н. Афонин, А.В. Волобуев. М.: Машиностроение-1, 2009. 172 с.
4. Ряшенцев Н.П., Ковлев Ю.З. Динамика электромагнитных импульсных систем. Новосибирск: Наука, 1974. 182 с.
5. Парфенов В.Э., Хандожко А.В. Конструктивные решения генераторов ударных импульсов для упрочняющей обработки специальных деталей. Российская наука в современном мире // Сборник статей XVII международной научно-практической конференции. М.: «Научно-издательский центр «Актуальность. РФ», 2018. Ч. I. 160 с.

Информация об авторах

Парфенов Владимир Эдуардович – научный сотрудник, Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50-лет Октября, д. 7), e-mail: parfenov.lvdu@mail.ru

Хандожко Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, начальник отдела модульного технологического оборудования, Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50-лет Октября, д. 7), e-mail: msi@tu-bryansk.ru

CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF THE SHOCK PULSE GENERATOR FOR HARDENING TREATMENT OF SPECIAL PARTS

V.E. Parfenov, A.V. Khandozhko

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract: methods of surface hardening using impact, the existing design of devices for the implementation of these methods are analyzed, the possibilities of using such technologies in the manufacture of special parts are considered. The article considers the general design solutions of shock hardening devices as applied to wave strain hardening, as well as the design of shock pulse generators for these devices, using different principles to form a blow: using a pneumatic or hydraulic actuator, using a crank mechanism, and electromagnetic pulsation. The advantages and disadvantages of these structures are analyzed from the point of view of the possibility and convenience of embedding such an instrument into the composition of the process equipment, process controllability, and also the main characteristics of the impact systems: single impact energy, impact frequency, efficiency, overall dimensions, etc. Based on the analysis made, a number of recommendations were formulated on the choice of a type of shock pulse generator for various technological tasks, and the limitations and areas of rational use of such generators were identified, including the type of processing and requirements for process equipment. The obtained histogram of the dependence of the impact energy on the frequency for various types of generators confirms and clearly demonstrates conclusions about the application areas of various shock pulse generators

Key words: pulse generator, General hardening theory, hardening in additive technologies, impact tool, impact machines

References

1. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Lazutkin A.G. "Technology and equipment of static-pulse treatment by surface plastic deformation" ("Tekhnologiya i oborudovanie statiko-impul'snoy obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem"), Moscow, Mashinostroenie, 2004, 288 p.
2. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Lazutkin A.G., Stepanov Yu.S. "Mechanics of wave deformation surface loading" ("Mekhanika nagruzheniya poverkhnosti volnoy deformatsii"), Moscow, Mashinostroenie -1, 2005, 149 p.
3. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Afonin A.N., Volobuev A. V., "Information and analytical support for the strengthening of static-pulse treatment" ("Informatsionno-analiticheskoe obespechenie uprochneniya statiko-impul'snoy obrabotkoy"), Moscow, Mashinostroenie -1, 2009, 172 p.
4. Ryashentsev N.P., Kolev Yu.Z. "Dynamics of electromagnetic pulse systems" ("Dinamika elektromagnitnykh impul'snykh sistem"), Novosibirsk: Nauka, 1974, 182 p.
5. Parfenov V.E., Khandozhko A.V. "Constructive solutions of the shock pulse generator for hardening treatment of special parts. Russian Science in the Modern World", *Collected Papers of XVII International Scientific-Practical Conference, part I*, Moscow, «Research and Publishing Center «Actualnots.RF», 2018, 160 p.

Submitted 10.06.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Vladimir E. Parfenov, Scientist, Bryansk State Technical University (7 Bul'var 50 letiya Otyabrya, Bryansk, 241035, Russia), e-mail: parfenov.lvdu@mail.ru

Aleksandr V. Khandozhko, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Bryansk State Technical University (7 Bul'var 50 letiya Otyabrya, Bryansk, 241035, Russia), e-mail: msi@tu-bryansk.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫХАЖИВАНИИ ШЛИФОВАЛЬНЫМ КРУГОМ

С.Г. Бишутин, А.А. Козленкова

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

Аннотация: статья посвящена исследованию процесса формирования высотных и шаговых параметров волнистости поверхности на этапе выхаживания периферией шлифовального круга. Исследования показали, что значительное влияние на волнистость поверхности в большинстве случаев оказывают последний рабочий ход инструмента (если в структуре операции шлифования цикл выхаживания отсутствует) и выхаживающие ходы шлифовального круга. Кроме того, меньшая волнистость достигается при шлифовании в условиях более жестких технологических систем. Показано, что при незначительном изменении частот вращения круга и заготовки в процессе обработки можно существенно снизить высоту волнистости поверхности. Однако простым и надежным способом технологического снижения волнистости поверхности является увеличение числа выхаживающих ходов круга. Установлено, что с увеличением числа выхаживающих ходов инструмента высота и шаг волнистости поверхности снижаются до 2-3 раз, причем наиболее сильное изменение параметров волнистости происходит на первых 7...9 выхаживающих ходах инструмента. После 12...15 выхаживающих ходов шлифовального круга волнистость поверхности практически не меняется. Получены зависимости для расчета высотных и шаговых параметров волнистости поверхности, учитывающие основные факторы процесса шлифования, в том числе и условия выхаживания абразивным инструментом. Представлены результаты экспериментальной проверки полученных теоретических зависимостей

Ключевые слова: шлифование периферией круга, волнистость поверхности

Введение

Современный уровень развития машиностроения предопределяет необходимость разработки технологических операций механической обработки, в ходе которых обеспечивается высокое качество деталей машин. Наиболее часто требуемое качество поверхности формируется при финишном шлифовании. Зачастую при шлифовании ответственных деталей машин возникает необходимость обеспечения заданной волнистости поверхности. Однако выбор режимов шлифования, обеспечивающих совокупность требуемых параметров качества, в том числе и волнистости поверхности, представляет значительные трудности. Известно, что при выхаживании поверхности шлифовальным кругом существенно улучшается её качество, имеется возможность снижения волнистости [1, 2]. Вместе с тем, исследования, позволяющие научно обоснованно выбрать условия выхаживания поверхности абразивным инструментом с учетом требуемых параметров волнистости, отсутствуют. В связи с этим данные исследования являются актуальными.

Постановка задачи

Исследование процесса формирования высотных и шаговых параметров волнистости поверхности при шлифовании периферией круга для научно обоснованного выбора условий выхаживания абразивным инструментом ответственных поверхностей деталей машин.

Механизм формирования волнистости поверхности при выхаживании шлифовальным кругом

Основной причиной образования волнистости поверхности является несовпадение требуемой и действительной траекторий движения абразивного инструмента относительно заготовки, которое обусловлено наличием колебательного движения рабочей поверхности инструмента относительно обрабатываемой поверхности заготовки [3, 4]. Источниками колебательных движений могут быть неотбалансированные вращающиеся элементы технологической системы (абразивный инструмент, электродвигатель станка, технологическая оснастка и пр.); геометрические погрешности формы рабочей поверхности, формируемые в процессе правки и при износе шлифовального круга; автоколебания, вызванные самим процессом обработки и т.п.

Механизм формирования волнистости поверхности рассмотрим применительно к плоскому шлифованию периферией круга. Волнистость поверхности в большинстве случаев будет сформирована на последнем рабочем ходе инструмента и/или в ходе выхаживающих ходов шлифовального круга. Предположим, что при абразивной обработке выполняются два выхаживающих хода инструмента. На последнем рабочем ходе волнистость поверхности зависит от размаха W_0 колебаний периферии круга относительно шлифуемой поверхности (рис. 1).

Траектория движения рабочей поверхности инструмента на первом выхаживающем ходе будет смещена относительно траектории на последнем рабочем ходе в вертикальном и горизонтальном направлениях. Смещение y_1 в вертикальном направлении вызывается силами упругости технологической системы, возникающими при снятии припуска с заготовки. Смещение x_1 в горизонтальном направлении обусловлено особенностями технологического оборудования, в частности, временем реверса стола шлифовального станка и расположением упоров рычага реверса его стола. Аналогичная ситуация будет наблюдаться и при втором выхаживающем ходе инструмента: траектория рабочей поверхности шлифовального круга на данном ходе будет смещена на x_2 и y_2 относительно предыдущей траектории по тем же причинам. Если продолжать выхаживание заготовки, то со временем процесс съема металла с обрабатываемой поверхности прекратится и смещение траекторий инструмента в вертикальном направлении происходить не будет. Как видим, траектории движения рабочей поверхности инструмента на выхаживающих ходах накладываются друг на друга, тем самым формируя волнистость обработанной поверхности заготовки довольно сложной формы (рис. 1). Очевидно, что меньшая волнистость будет формироваться при шлифовании в условиях более жестких технологических систем.

Теоретические исследования формирования волнистости поверхности при шлифовании

Конечная волнистость поверхности $W(x)$, как было показано выше, является результатом наложения профилей волнистости $V_1(x), \dots, V_n(x)$, образуемых при каждом контакте шлифовального круга с рассматриваемым сечением обрабатываемой поверхности (где x – координата профиля волнистой поверхности). Поэтому можно считать, что $V_i(x)$ ($1 \leq i \leq n$) является

случайным стационарным нормальным процессом, а величина

$$W(x) = \max V_i(x), 1 \leq i \leq n, \quad (1)$$

где n – число контактов шлифовального круга с рассматриваемым сечением обрабатываемой поверхности будет максимальным элементом выборки $V_1(x), \dots, V_n(x)$, теория распределения которого разработана в математической статистике [5, 6].

Формирование максимального элемента $W(x)$ выборки $V_1(x), \dots, V_n(x)$ с определенным допущением можно трактовать как изменение масштаба T рассматриваемой реализации случайного процесса. В таком случае, зависимости для определения высотных (W) и шаговых (S) параметров волнистости поверхности можно записать следующим образом:

$$W = W_1/T; S = S_1/T, \quad (2)$$

где W_1, S_1 – высота и шаг волнистости обрабатываемой поверхности после одного рабочего хода инструмента.

Уравнения (1) и (2) являются исходными для получения расчетных зависимостей параметров волнистости поверхности.

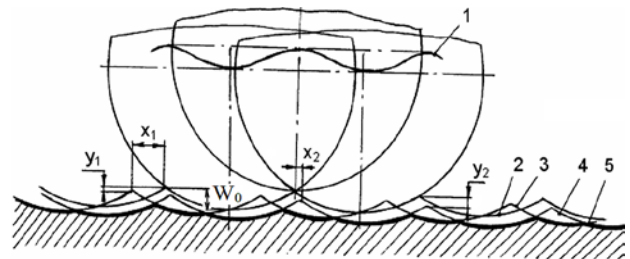


Рис. 1. Схема формирования волнистости обрабатываемой поверхности при шлифовании периферией круга: 1 – траектория движения центра шлифовального круга; 2 – траектория движения рабочей поверхности круга на последнем рабочем ходе; 3, 4 – траектории движения рабочей поверхности круга соответственно на первом и втором выхаживающих ходах; 5 – волнистость шлифованной поверхности заготовки

Таким образом, в ходе математических преобразований зависимостей (1) и (2) были получены следующие уравнения для расчета средней высоты W_z и шага Sm_w волнистости шлифованной поверхности

$$W_z = W_1 \beta^{u-1}; \quad (3)$$

$$W_1 = \begin{cases} W_0, & W_0 < \frac{(V_3/(H^*n_K))^2}{4D_K}; \\ \frac{(V_3/(H^*n_K))^2}{4D_K}, & W_0 \geq \frac{(V_3/(H^*n_K))^2}{4D_K}, \end{cases}$$

$$Sm_w = \left(\frac{V_3}{n_k H^*} \right) \beta^{u-1}, \quad (4)$$

где W_0 – размах колебаний рабочей поверхности шлифовального круга относительно обрабатываемой поверхности (при предварительном шлифовании эта величина равна 8...12 мкм, при окончательном – 4...7 мкм, тонком – 1...3 мкм); D_3, D_k – диаметр, соответственно, заготовки и круга; V_3 – скорость вращения (перемещения) заготовки; β, u – коэффициент и показатель степени, характеризующие процесс изменения волнистости поверхности при выхаживании шлифовальным кругом; n_k – частота вращения шлифовального круга.

Величина H^* в уравнениях (3) - (4) определяется схемой шлифования.

При бесцентровом, круглом наружном и внутреннем шлифовании периферией круга с продольной подачей V_{SM}

$$H = \frac{k_L B}{3,14 D_3 V_{SM}} V_3. \quad (5)$$

При плоском шлифовании на станках с прямоугольным столом с периодической поперечной подачей S_{Π}

$$H = k_L \frac{B}{S_{\Pi}}. \quad (6)$$

При круглом врезном шлифовании периферией круга (в том числе и бесцентровом), а также при плоском шлифовании периферией круга без периодической поперечной подачи на станках с прямоугольным столом $H^*=1$.

В уравнениях (5) - (6): k_L – коэффициент, учитывающий долю площади рабочей поверхности шлифовального круга, контактирующую с обрабатываемой поверхностью (для круга после правки $k_L=1$, для круга в конце периода стойкости (для изношенного круга) – $k_L = 0,70...0,85$); B – высота шлифовального круга.

Анализ полученных зависимостей показывает, что эффективным средством технологического снижения волнистости поверхности является выбор режимов шлифования, обеспечивающих требуемый сдвиг (x_1, x_2) фаз колебаний (см. рис. 1) при последующих ходах инструмента и/или оборотах заготовки.

Минимальная волнистость поверхности при шлифовании периферией круга будет наблюдаться вследствие сдвига фаз колебаний инструмента при выполнении следующего условия:

$$\frac{V_3}{v_k} C_q - L^* = \frac{1}{H^*} \frac{V_3}{v_k}, \quad (7)$$

где v_k – частота колебаний рабочей поверхности инструмента (в большинстве случаев пропорциональна частоте вращения шлифовального круга); C_q – минимальное целое число волн, необходимое для выполнения условия $V_3 C_q / v_k > L^*$; L^* – перемещение инструмента за один рабочий ход при плоском шлифовании или длина окружности обрабатываемой поверхности при круглом шлифовании.

Из формулы (7) следует, что при незначительном изменении в процессе обработки величины V_3/v_k можно существенно снизить высоту волнистости поверхности. Однако реализация на практике такого пути сопряжена со значительными трудностями. Поэтому приемлемым способом снижения волнистости поверхности является увеличение числа выхаживающих ходов инструмента или времени выхаживания.

Экспериментальные исследования формирования волнистости поверхности при выхаживании абразивным инструментом

Для подтверждения состоятельности проведенных теоретических исследований были проведены эксперименты. На станке 3Г71 шлифовались образцы из стали 45 с различной длительностью выхаживания. Режимы обработки были следующими: шлифовальный круг 1-200×76×40 24A40CM16K5; скорость стола станка – 10 м/мин; глубина шлифования – 12 мкм. Затем на профилографе-профилометре мод. 170311 были сняты волнограммы с обработанных поверхностей образцов (рис. 2). На образцах, обработанных без выхаживания, сформировалась волнистость высотой $W_1=3,4-3,7$ мкм и шагом $Sm_w=3,5-4$ мм. На остальных образцах высота волнистости поверхности была тем меньше, чем больше выхаживающих ходов инструментом было сделано.

Затем с помощью формул (3) и (4) были рассчитаны высота и шаг волнистости поверхности после шести, десяти и тридцати выхаживающих ходов шлифовального круга. Результаты расчетов были сопоставлены с полученными экспериментальными данными (рис. 3, 4).

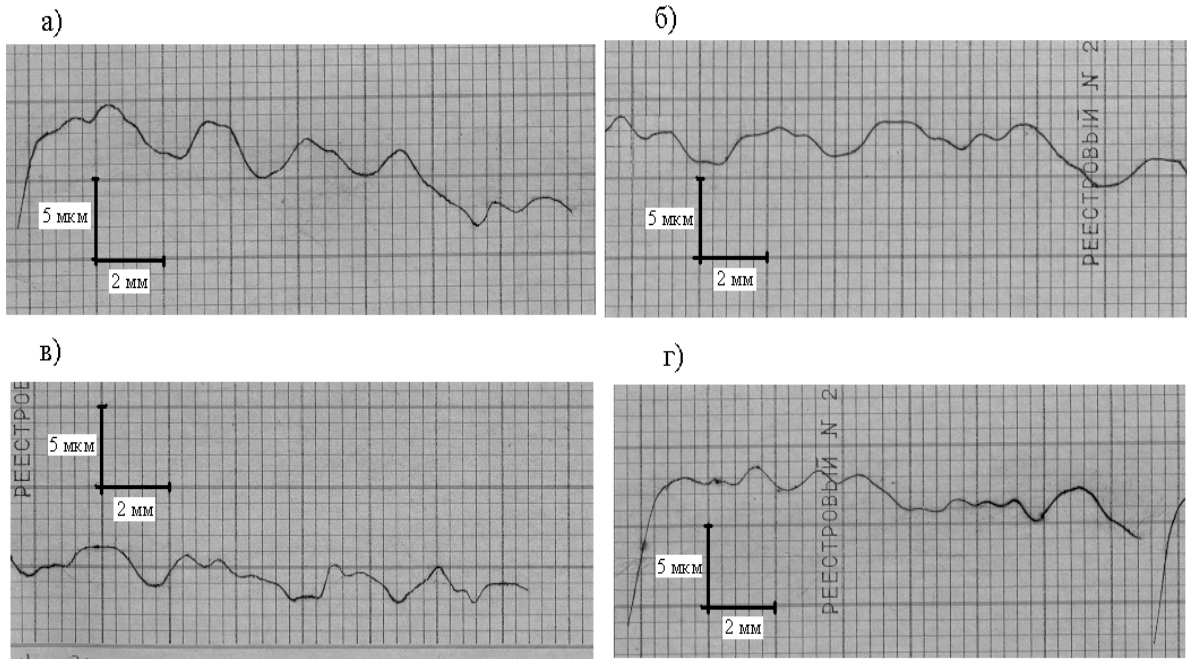


Рис. 2. Волнограммы поверхностей образцов, обработанных без выхаживания (а), с шестью (б), десятью (в) и тридцатью (г) выхаживающими ходами шлифовального круга

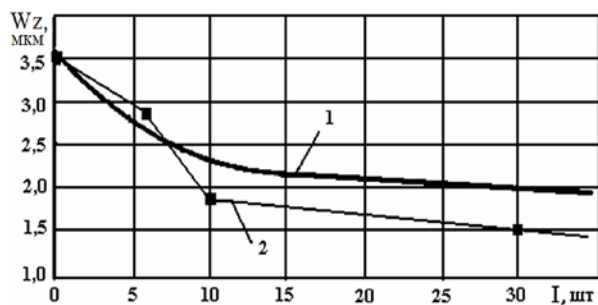


Рис. 3. Изменение высоты W_z волнистости поверхности в зависимости от числа I выхаживающих ходов шлифовального круга: 1 – расчет по формуле (3); 2 – экспериментальные данные

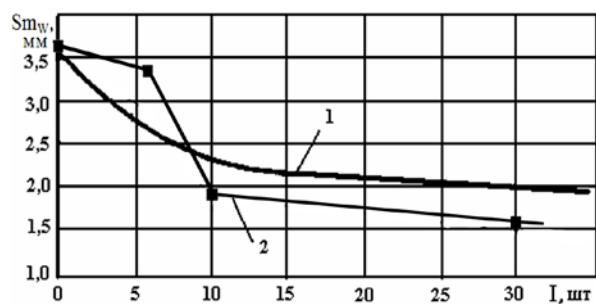


Рис. 4. Зависимость шага Sm_w волнистости поверхности от числа I выхаживающих ходов шлифовального круга: 1 – расчет по формуле (4); 2 – экспериментальные данные

Как видим, наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Анализ результатов экспериментов показывает, что с увеличением числа выхаживающих ходов инструмента высота и шаг волнистости поверхности снижаются до 2-3 раз, при-

чем наиболее сильное изменение параметров волнистости происходит на первых 7...9 выхаживающих ходах инструмента. После 12...15 выхаживающих ходов волнистость поверхности практически не меняется.

Выводы и результаты

Проведенные исследования показали, что значительное влияние на волнистость поверхности в большинстве случаев оказывает последний рабочий ход инструмента (если в структуре операции шлифования цикл выхаживания отсутствует) и выхаживающие ходы шлифовального круга. Кроме того, меньшая волнистость достигается при шлифовании в условиях более жестких технологических систем.

Существенно снизить высоту волнистости поверхности можно путем незначительного изменения частот вращения круга и заготовки в процессе обработки, что достаточно сложно реализовать на практике. Поэтому простым и надежным способом технологического снижения волнистости поверхности является увеличение числа выхаживающих ходов круга.

Введение в структуру технологической операции шлифования цикла выхаживания позволяет снизить высоту и шаг волнистости поверхности до 2-3 раз. Однако после 12...15 выхаживающих ходов инструмента параметры волнистости практически не меняются.

Полученные зависимости для расчета высотных и шаговых параметров волнистости поверхности учитывают основные факторы про-

цесса шлифования, в том числе и условия выхаживания абразивным инструментом.

Результаты исследований позволяют осуществлять научно обоснованный выбор режимов шлифования и условий выхаживания абразивным инструментом ответственных поверхностей деталей машин с учетом требуемых параметров волнистости.

Литература

1. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф.

Технология шлифования в машиностроении. СПб.: Политехника, 2007. 424 с.

2. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании. М.: Машиностроение-1, 2004. 144 с.

3. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Сулов и др.; под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

4. Сулов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.

5. Розанов Ю.А. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика. М.: Наука, 1989. 320 с.

6. Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Барсуков Г.В. Моделирование микрорельефа абразивного инструмента и поверхности детали. М.: Машиностроение-1, 2004. 215 с.

Поступила 03.06.2019; принята к публикации 05.08.2019

Информация об авторах

Бишутин Сергей Геннадьевич - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Брянский государственный технический университет (241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7), тел. 8-483-256-09-95, e-mail: nad-bisch@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9430-2936>

Козленкова Алла Александровна - аспирант, Брянский государственный технический университет (241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7), тел. 8-483-256-09-95, e-mail: alya.nice3010@gmail.com

FORMING WAVINESS OF THE PROCESSED SURFACE WHEN RUBBING BY AN ABRASIVE WHEEL

S.G. Bishutin, A.A. Kozlenkova

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract: the article is devoted to the study of the formation of high-altitude and stepping parameters of the surface waviness at the stage of sparking-out with the grinding wheel periphery. Studies have shown that in most cases the last working stroke of the tool and sparking-out moves of the grinding wheel (if there is no sparking-out process in the grinding operation) has a significant effect on the waviness of the surface. In addition, less waviness is achieved when grinding under more severe technological systems. It is shown that with a slight change in the rotational speeds of the wheel and the workpiece during processing, it is possible to significantly reduce the height of the waviness of the surface. However, a simple and reliable method of technological reduction of the surface waviness is to increase the number of sparking-out moves of the wheel. It was established that with an increase in the number of sparking-out tool moves, the height and step of the surface waviness decrease by 2-3 times, with the strongest change in the waviness parameters occurring in the first 7 ... 9 sparking-out moves of the tool. After 12 ... 15 sparking-out moves of the grinding wheel, the waviness of the surface practically does not change. The dependences for calculating the height and stepping parameters of the surface waviness are obtained, taking into account the main factors of the grinding process, including the conditions of sparking-out with an abrasive tool. The results of experimental verification of the obtained theoretical dependences are presented

Key words: grinding by the periphery of abrasive wheel, waviness of surface

References

1. Kremen' Z.I., Yuryev V.G., Baboshkin A.F. "Technology of grind in mechanical engineering" ("Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroyeniye"), St. Petersburg, Politekhnik, 2007, 424 p.
2. Bishutin S.G. "Providing the required set of parameters of quality of surface layers of details at grind" ("Obespechenie trebuyemykh parametrov kachestva poverkhnostnykh sloevy detaley pri shlifovanii"), Moscow, Mashinostroyeniye-1, 2004, 144 p.
3. Suslov A.G. et al. "Engineering of surface of details" ("Inzheneriya poverkhnosti detaley"), Moscow, Mashinostroyeniye, 2008, 320 p.
4. Suslov A.G., Dal'skiy A.M. "Scientific fundamentals of mechanical engineering technology" ("Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroyeniya"), Moscow, Mashinostroyeniye, 2002, 684 p.
5. Rozanov Yu.A. "Probability theory, random processes and mathematical statistics" ("Teoriya veroyatnostey, sluchaynye protsessy i matematicheskaya statistika"), Moscow, Nauka, 1989, 320 p.
6. Stepanov Yu.S., Belkin E.A., Barsukov G.V. "Modelling of microrelief of the abrasive tool and surface detail" ("Modelirovaniye mikrorel'yefa abrazivnogo instrumenta i poverkhnosti detali"), Moscow, Mashinostroyeniye -1, 2004, 215 p.

Submitted 03.06.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Sergey G. Bishutin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Bryansk State Technical University (7 Bul'var 50 letiya Ocyabrya, Bryansk, 241035, Russia), e-mail: nad-bisch@yandex.ru, tel. 8-483-256-09-95, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9430-2936>

Alla A. Kozlenkova, Graduate student, Bryansk State Technical University (7 Bul'var 50 letiya Ocyabrya, Bryansk, 241035, Russia), e-mail: alya.nice3010@gmail.com, tel. 8-483-256-09-95

РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОБИЛЬНОГО ФРЕЗЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.М. Козлов¹, Е.В. Кирющенко², А.А. Козлов¹

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк, Россия

Аннотация. Развитие машиностроительного производства привело к созданию мобильного оборудования – станков, которые могут устанавливаться на обрабатываемом изделии. Отличительной особенностью таких станков является отсутствие станины, что делает технологическую систему маложесткой. Это в ряде случаев приводит к возникновению вибраций в технологической системе, что ограничивает производительность процесса, снижает стойкость инструмента и увеличивает износ узлов станка. Возникновение и развитие вибраций при обработке наиболее характерно для фрезерования, когда сама конструкция инструмента определяет прерывистость резания. Наиболее универсальным параметром, характеризующим компоненты вибрации, является виброскорость. При обработке фрезерованием с использованием мобильного оборудования предлагается воздействовать на колебательный процесс с помощью введения в технологическую систему дополнительной колеблющейся массы (демпфера), параметрами колебаний которой можно управлять независимо от режимов резания. Анализ динамической системы при фрезеровании показал, что при равенстве собственной и вынуждающей частот сдвиг фаз может быть равен только $-\pi/2$. Это значение сдвига фаз соответствует условиям возникновения резонанса. Если достаточное количество энергии потратится на установление положения равновесия, то на возбуждение колебаний её останется меньше и резонанс не наступит. Эффективно компенсировать влияние регенеративных колебаний можно, создав такие условия работы системы, при которых энергия колебательных процессов будет постоянно расходоваться на такую перенастройку

Ключевые слова: фрезерование, колебания, вибрационный процесс, режимы резания, демпфирование

Введение

Фрезерование является одним из самых распространенных методов обработки деталей, поэтому его исследованию с целью повышения качества и производительности обработки уделяется значительное внимание [1, 2]. Применение мобильного или портативного металлорежущего оборудования в ряде случаев не имеет альтернативы, но накладывает ряд ограничений на технологический процесс. Особенностью такого оборудования является отсутствие фундамента и станины, поэтому технологическая система в данном случае будет обладать меньшей жесткостью по сравнению со стационарными станками. Это приводит к возникновению вибраций в технологической системе, что ограничивает производительность процесса, снижает качество обработки и стойкость инструмента. Технологическая система, обладая достаточной собственной устойчивостью, оказывается неустойчивой при установке оборудования на место обработки, что особенно характерно для процесса фрезерования [3].

Постановка задачи

Важным показателем мобильного металлорежущего оборудования является его виброустойчивость. На основе анализа виброустойчивости можно исследовать динамические процессы технологической системы станка через относительные показатели изменения компонент вибрации и понять процессы стабилизации отдельных видов колебаний его механизмов. Наиболее универсальным параметром компонент вибрации является виброскорость, так как имеет равномерный характер в широком частотном диапазоне. Виброустойчивость, определенная по виброскорости, является комплексным показателем для анализа состояния технологической системы и отдельных её элементов [4].

Система резания (рис. 1) в данном случае представляет собой совокупность входных и выходных параметров, где отдельное внимание уделено среде, в которой проходит процесс резания, т.е. совокупностью внешних условий, которые могут повлиять на устойчивость системы.

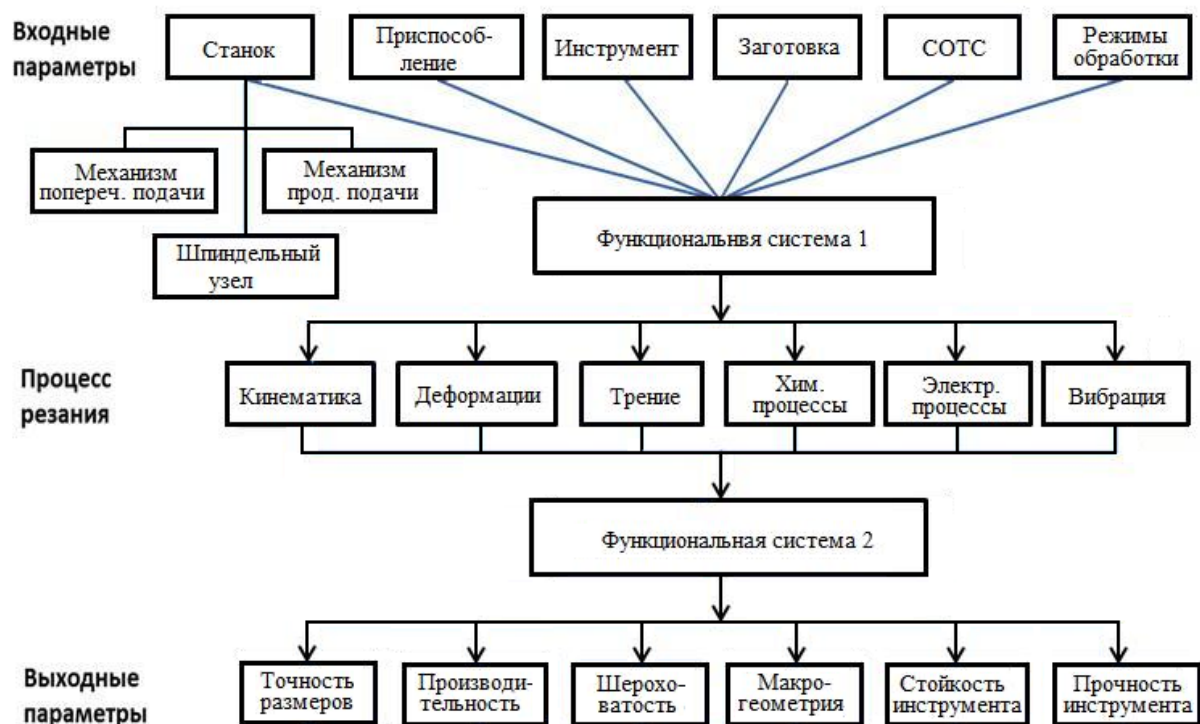


Рис. 1. Система резания при использовании мобильного оборудования

Методы исследования

В качестве основы для процесса резания технологическую систему металлорежущего оборудования следует рассматривать как замкнутую колебательную систему со многими степенями свободы, в каждой из которых возникают самостоятельные колебательные процессы [5, 6]. В технологической системе фрезерного оборудования есть несколько видов колебательных процессов: собственные колебания – колебания, обусловленные внутренними характеристиками; вынужденные колебания, которые возникают из-за прерывистого характера резания, наличия дисбаланса в конструкции оборудования (в том числе из-за износа движущихся узлов и нарушения правил эксплуатации) и тепловых процессов в зоне резания и кинематических узлах; автоколебания, которые возникают из-за неравномерной толщины срезаемого слоя металла и перераспределения энергии от других источников.

При фрезеровании с использованием мобильного оборудования можно воздействовать на колебательный процесс с помощью введения в технологическую систему дополнительной колеблющейся массы (демпфера), параметрами колебаний которой можно управлять независимо от режимов резания. Возникший колебательный процесс будет оказывать влия-

ние на вибрации во всей системе, колеблясь с ними с определённой разностью фаз (рис. 2), т.е. параметры колебаний демпфера будут определённым образом отличаться от вибрации технологической системы.

Уравнение движения системы запишем как проекций на соответствующую плоскость:

$$\begin{cases} m_x \ddot{x} + h_x \dot{x} + c_x x = -P_y \sin(\gamma) - P_z \cos(\gamma) \\ m_y \ddot{y} + h_y \dot{y} + c_y y = -P_y \cos(\gamma) - P_z \sin(\gamma) \end{cases} \quad (1)$$

где m_1 – масса системы, кг; c_1 – жесткость системы, h – коэффициент демпфирования; P_i – вынужденная сила, действующая на систему.

Дифференциальные уравнения системы с демпфером имеют вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + h \dot{x}_1 + (c_1 + c_2)x_1 - h \dot{x}_2 - c_2 x_2 &= F_i, \\ m_2 \ddot{x}_2 - h \dot{x}_1 - c_2 x_1 + h \dot{x}_2 + c_2 x_2 &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_1 – масса системы, кг; m_2 – масса гасителя, кг; c_1 – жесткость системы, c_2 – жесткость демпфера, h – коэффициент вязкого сопротивления.

Результаты

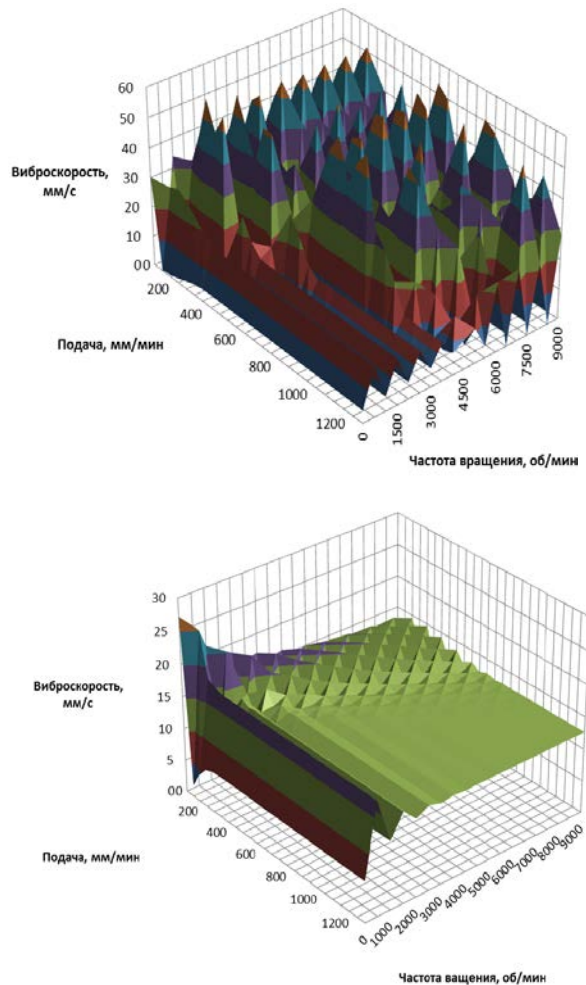


Рис. 2. Влияние режимов резания на виброскорость с использованием мобильного оборудования при наличии демпфера (вверху) и без него

Система с малым коэффициентом жесткости, но устойчивая при резании по следу, может стать неустойчивой, когда коэффициент жесткости станет больше некоторой величины. При равенстве собственной и вынуждающей частот сдвиг фаз может быть равен только $-\pi/2$. Это значение сдвига фаз соответствует условиям возникновения резонанса. Значит, эффективно компенсировать влияние регенеративных колебаний можно, создав условия работы системы, при которых энергия колебательных процессов будет постоянно расходоваться на такую перенастройку. Если достаточное количество энергии потратится на установление положения равновесия, то на возбуждение колебаний её останется меньше. И если период волны на поверхности резания не будет совпадать с периодом собственных колебаний, то уровень колебаний будет намного меньше и резонанс не наступит.

Теоретические положения были проверены экспериментально. Форма колебаний (рис. 3), полученных при исследовании технологической системы, состоит из двух частей: переходного процесса, обусловленного врезанием инструмента, и уже установившегося движения.

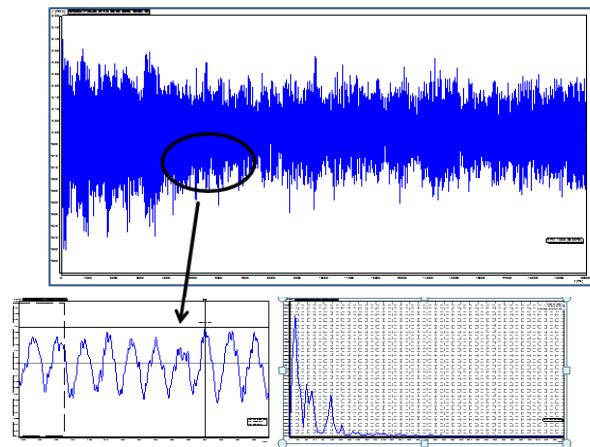


Рис. 3. Спектральный анализ колебаний шпинделя мобильного станка для одной частоты вращения инструмента

Выбираем часть области уже установившегося движения для данного режима и все экстремумы графика движения этой области откладываем в виде точек с соответствующими ординатами, где по оси абсцисс откладываем частоту колебаний инструмента. В результате получаем графический расчёт виброскорости по пиковым значениям амплитуды вибрации при исследовании вынужденных колебаний со значением подачи 70 мкм/зуб. Режим считается неустойчивым и его дальнейшее рассмотрение нецелесообразно, если превысить граничное значение амплитуды колебаний (в данном случае 1 мм).

Резонансный характер увеличения амплитуды колебаний показывает расположение пиков на диаграмме гармоник для определенных частот. Наличие сил резания, связанных с частотами вибрации, кратными частоте прохождения зубьев при обработке, объясняет наличие многочисленных пиков в спектре колебаний рассматриваемого режима (рис. 4). На рис. 5 рассмотрено формирование сил резания и их частотный анализ в окрестности первого и второго пика. Первый пик спектра обусловлен частотой прохождения зубьев, а второй пик – второй гармоникой сил резания. Поэтому ско-

рость вибрации фрезы в 2 раза меньше чем около первого пика.

За счет запаздывания в спектре (рис.4) появляются дополнительные гармоники, одна из которых близко подходит к резонансной частоте системы, что обуславливает высокую амплитуду вибраций. Данный режим является неустойчивым с точки зрения регулярного резания. Но в системе устанавливается другой стационарный режим движения, сопровождающийся существенно более высокими амплитудами колебаний. Использование частоты 0,44 для процесса концевой фрезерования является нежелательным из-за значительного роста амплитуды колебаний системы и резкого изменения сил резания. Таким образом, между частотами 0,4 и 0,44 проходит граница области устойчивости регулярного резания. При дальнейшем увеличении относительной частоты вибрации в системе нарастают. Тогда режим обработки становится все менее применимым. Граничный режим соответствует значению 0,51 относительной скорости вращения фрезы. Тогда граница области нестабильных режимов резания заканчивается при значениях $\omega > 0,51$. При $\omega > 0,54$ начинается новая область неустойчивости процесса резания.

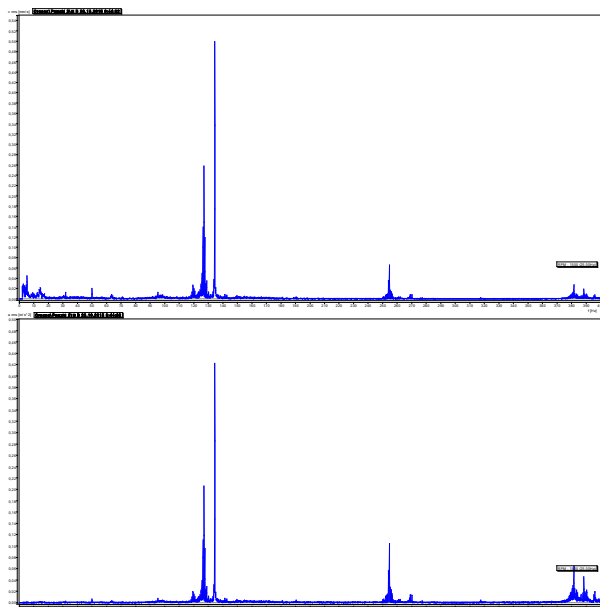


Рис. 4. Спектры вынужденных колебаний виброскорости (вверху) и виброускорения для диапазона 0.3...3.3 мм/с

Резонансные или околорезонансные процессы из-за совпадения собственной частоты системы и частоты вынужденных колебаний способствуют увеличению уровня вибрации при возмущениях по следу. Полученные результаты показали: параметром, влияющим

на уровень колебаний, является сдвиг фаз в начальный момент резания по следу. При начальном сдвиге, равном $\pi/2$, наблюдается минимальный уровень колебаний, а максимальный – при $-\pi/2$. Колебания достаточно быстро затухают, если начальный сдвиг фаз отличен от $-\pi/2$, так как часть энергии колебательного процесса расходуется на сохранение равновесия системы. Если же начальный сдвиг фаз равен $-\pi/2$, система сразу же перестраивается на необходимый сдвиг фаз, в результате чего возникают установившиеся колебания. Значит, в существующую конструкцию мобильного металлорежущего оборудования будет добавлено демпфирующее устройство, являющееся дополнительным источником энергии, на преобразование которой будет расходоваться колебательная энергия технологической системы. При этом становится возможным устранить резонансные колебания с большими амплитудами на заданных частотах (рис. 5).

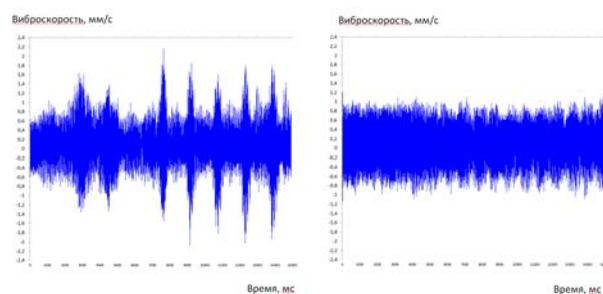


Рис. 5. Изменение виброскорости на режиме $n = 7800 \text{ мин}^{-1}$, $S = 200 \text{ мм/мин}$ до (слева) и после установки демпфера



Рис. 6. Обработка стальной пластины на мобильном фрезерном станке SBJ1400, предназначенном для алюминиевых сплавов

Для исследования влияния демпфирующего устройства использовался мобильный фрезерный станок SBJ1400 с системой ЧПУ (рис.

б). Данное оборудование предназначено для обработки алюминиевых сплавов. Задача экспериментального исследования заключалась в определении уровня колебательной активности системы при расширении технологических возможностей оборудования. Применялись однотипные фрезы диаметром 8 мм с числом зубьев $z = 5$. В качестве заготовок использовались алюминиевые и стальные пластины.

В устойчивом режиме резания при упругих деформациях инструмента нагрузка на каждый его зуб при каждом проходе распределена равномерно. Движение технологической системы происходит в автоколебательном режиме за счет механизма запаздывания. При использовании демпфирующего устройства вызванные принудительно колебания способствуют тому, что каждый зуб фрезы срезает необходимый объём материала. Инструмент при активном демпфировании равномерно нагружен, общий уровень колебаний системы снижается (рис. 7), в результате появляется возможность интенсифицировать процесс резания без роста уровня вибрации. Это позволяет повысить как производительность процесса, так и обрабатывать более твёрдые материалы.

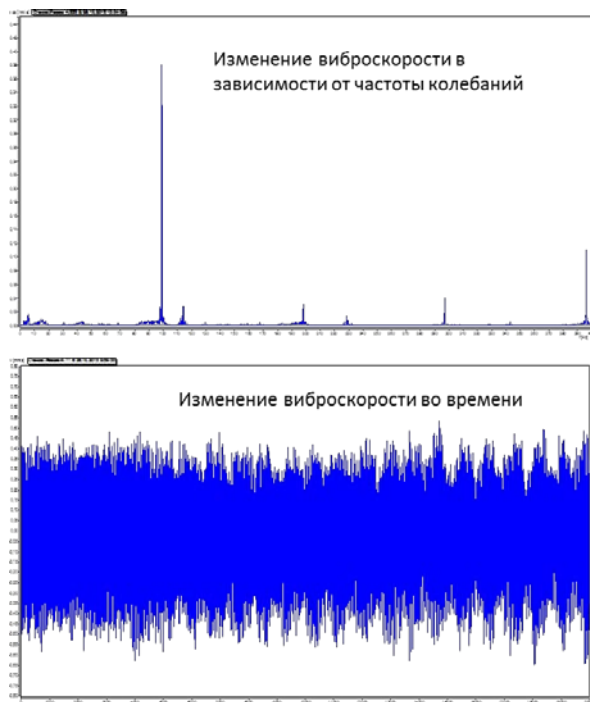


Рис. 7. Изменение виброскорости при обработке стальной пластины на мобильном фрезерном оборудовании

Вывод

В результате выполнения работы установлено, что можно активно воздействовать на вибрации, возникающие в процессе фрезерования на мобильном оборудовании, что позволяет расширить технологические возможности такого оборудования - повысить производительность процесса и обрабатывать материалы с более высокими механическими свойствами.

Литература

1. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение производительности чистового объемного фрезерования на станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. 2013. 11(29). С. 14-18.
2. Козлов А.М., Кирющенко Е.В. Технологическое обеспечение точности фрезерной обработки крупногабаритных деталей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 3. С. 65-73.
3. Свинин В.М. Исследование регенеративных автоколебаний при многолезвийной обработке // Обработка металлов. 2005. № 3 (28). С. 28-30.
4. Force and Displacement Transmissibility of a Non-linear Isolator With High-Static-Low-Dynamic-Stiffness / A. Carrella, M. J. Brennan, T.P. Waters, and V. Lopes Jr. // Int. J. Mech. Sci., 2012. 55(1), pp. 22-29.
5. Городецкий Ю.И., Стребуляев С.Н., Майорова Ю.Е. Исследование автоколебаний динамической системы фрезерного станка с нелинейным элементом // Вестник научно-технического развития. Национальная Технологическая Группа. 2009. № 9 (25). С. 91-95.
6. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Лукьянов А.Д. Условия параметрического самовозбуждения динамической системы фрезерования концевыми фрезами // СТН. 2016. № 6. С. 10-16.

Поступила 10.06.2019; принята к публикации 05.08.2019

Информация об авторах

Козлов Александр Михайлович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: kam-48@yandex.ru, тел. 8-905-044-90-10, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7650-0616>

Кирющенко Евгений Владимирович - канд. техн. наук, начальник технологического отдела Ремонтного управления, ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (398040, г. Липецк, пл. Металлургов, 2), e-mail: ironfalcon@mail.ru, тел. 8-952-596-85-89

Козлов Андрей Александрович - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: soy4astnik@mail.ru, тел. +7-904-218-85-44, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1841-7106>

EXPANSION OF TECHNOLOGICAL CAPABILITIES of MOBILE MILLING EQUIPMENT

A.M. Kozlov¹, E.V. Kiryushchenko², A.A. Kozlov¹

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Novolipetsk Metallurgical Plant, Lipetsk, Russia

Abstract: the development of machine production has led to the creation of mobile equipment – machines that can be installed on the treated product. A distinctive feature of these machines is the lack of the frame, which makes the technological system not rigid. This, in some cases, leads to the occurrence of vibrations in the technological system, which limits the productivity of the process, reduces tool life and increases wear of machine components. The emergence and development of vibration are the most characteristic of milling when the design tool detects the intermittence of cutting. The most universal parameter characterizing the components of vibration is velocity. When milling with the use of mobile equipment, we proposed to influence the oscillatory process with introducing additional oscillating mass (damper) into the technological system, the vibration parameters of which can be controlled independently of the cutting data. Analysis of the dynamic system in milling operations showed that the equality of own and driving frequencies, the phase shift can be equal only $-\pi/2$. This value of phase shift corresponds to the conditions of occurrence of resonance. If a sufficient amount of energy spent on the establishment of the equilibrium position, the excitation of vibrations will be less and the resonance will not occur. Effectively compensate for the effect of regenerative oscillation by creating a working environment of the system in which the energy of oscillatory processes will be continuously consumed to such reconfiguration

Key words: milling, vibrations, vibration process, cutting conditions, damping

References

1. Kozlov A.M., Malyutin G.E. "Improving the performance of finishing volume milling on CNC machines", *High Technologies in Mechanical Engineering (Naukoyemkie tekhnologii v mashinostroenii)*, 2013, no. 11(29), pp. 14-18.
2. Kozlov A.M., Kiryushchenko E.V. "Technological support of precision milling of large parts", *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2012, no. 3, pp. 65–73.
3. Svinin V.M. "Study of regenerative self-oscillation in productive processing", *Metalworking (Obrabotka metallov)*, 2005, no. 3(28), pp. 28-30.
4. Carrella A., Brennan M. J., Waters T.P., Lopes V.Jr. "Force and displacement transmissibility of a nonlinear isolator with high-static-low-dynamic-stiffness", *Int. J. Mech. Sci.*, 2012, no. 55(1), pp. 22-29.
5. Gorodetskiy Yu.I., Strebulyaev S.N., Mayorov Yu.E. "Study of self-oscillations of a dynamic system of milling machine with a non-linear element", *Bulletin of Scientific-Technical Development. National Technology Group (Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya. Natsional'naya Tekhnologicheskaya Gruppya)*, 2009, no. 9(25), pp. 91-95.
6. Zakovorotnyy V.L., Gubanova A.A., Luk'yanov A.D. "Conditions for parametric excitation of a dynamic system milling end mills", *STIN*, 2016, no. 6, pp. 10-16.

Submitted 10.06.2019; revised 05.08.2019

Information about the authors

Aleksandr M. Kozlov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: kam-48@yandex.ru; tel.: +7-905-044-90-10, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7650-0616>

Evgeniy V. Kiryushchenko, Cand. Sc. (Technical), Head of Technological Department of Repair Department, Novolipetsk metallurgical plant (2 Metallurgov square, Lipetsk 398040, Russia), e-mail: ironfalcon@mail.ru; tel. +7-952-596-85-89

Andrey A. Kozlov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: soy4astnik@mail.ru; tel.: +7-904-218-85-44, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1841-7106>