

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098
от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» (141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42) Издается с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
2. Технические науки; 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации [2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование, конструкция и производство лягательных аппаратов]; 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

Подписной индекс в каталоге
«Почта России» ПП9997

Главный редактор
Артишонко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-30 (доб. 138),
E-mail: rio-kimes@mail.ru,
Site: www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

Попова Ю.С.
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ МНОГОСПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ 3

Самохина Н.С., Прокопенко А.С.
РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПРОГРАММНОГО КОДА 13

Стариченков Д.И., Шульженко С.Н.
ЭЛЕМЕНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ 25

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Ионченкова Я.Ю., Самаров Е.К.
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ ВЕКТОРНОГО АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОГО АЛГОРИТМА ПОДАВЛЕНИЯ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ НЕГАУССОВЫХ ПОМЕХ В ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АНТЕННАХ 38

Самаров Е.К.
МОДЕЛИРОВАНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА ПО ЕГО КОРОТКИМ РЕАЛИЗАЦИИ 50

Семенов А.Б., Аббасова Т.С., Войко О.А.
ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ 57

Чебакова В.Ю.
ЭЛЕКТРОЭКСТРАКЦИЯ ЦИНКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОДНОМЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ 76

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. **Барканов Е.Н.**, Dr.sc.ing.
2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. **Аббасов Э.М.**, к.т.н.
2. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
3. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
4. **Бершадский В.А.**, д.т.н., профессор кафедры
5. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
6. **Кучеров Б.А.**, к.т.н.
7. **Логачев И.А.**, к.т.н.
8. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
9. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
10. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
11. **Мороз А.П.**, д.т.н., профессор
12. **Мосалов О.П.**, к.ф.-м.н.
13. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
14. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
15. **Самаров Е.К.**, д.т.н., доцент
16. **Скрябин М.Л.**, к.т.н.
17. **Соляной В.Н.**, к.т.н.
18. **Стреналик Ю.В.**, д.т.н., профессор
19. **Халиуллин В.И.**, д.т.н., профессор
20. **Чесноков А.В.**, д.т.н.
21. **Щурин К.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 25.09.2025

Формат 70x100/16/

Печать офсетная. Усл. печ. л. 10.

Тираж 500 экз. Заказ № 4890.

Отпечатано в типографии
ИП Копыльцов П.И. 394052,
Россия, г. Воронеж,
ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56.
Тел.: 8 (950) 765 69 59

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Агеенко Ю.И., Архипов С.В.
**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
МАЛОЙ ТЯГИ ПРИ ИХ РАБОТЕ В ИМПУЛЬСНОМ
РЕЖИМЕ** 89

Кротов Е.А.
**УЛУЧШЕНИЕ ВАРИАНТА ТЗЯО ГЕОМЕТРИЧЕСКИ
НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК.**.. 101

Чернов А.К.
**ПОДХОДЫ К ПЛАНИРОВАНИЮ СЪЕМОК
КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ** ... 107

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Гончаров В.В., Пиунов В.Ю.
**ЗАМЕНА МЕДНЕНИЯ ПРИПУСКОМ
НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ ПРИ
ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ
СТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ** 116

Смирнов Д.В.
**ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ПОРОШКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ
НА СОСТАВ И СТРУКТУРУ МАТРИЦЫ
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА,
ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ RMI**..... 125

Яговкина А.Н.
**ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОД-
УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА НА ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ
МАТРИЦЫ МЕТОДОМ** 132

УДК 2.3.1.

Оценка эффективности алгоритмов маршрутизации в низкоорбитальных многоспутниковых системах связи

Юлия Сергеевна Попова, кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Управления качеством и стандартизации»,
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова» –
филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии»,
г. Королев, Московская область

Nизкоорбитальные системы спутниковой связи являются ключевой частью глобальной телекоммуникационной экосистемы. К середине 2025 года на низких орbitах функционирует более девяти тысяч космических аппаратов, обеспечивающих непрерывное широкополосное покрытие. Для таких сетей маршрутизация трафика является основной задачей, поскольку граф межспутниковых лазерных линий связи (ISL) изменяется каждые 5-10 с. В статье предлагается методика многокритериальной оценки эффективности алгоритмов маршрутизации, объединяющая визуальную и численную аналитику.

Управление качеством, низкоорбитальные системы спутниковой связи, KPI, AHP, нечёткая логика.

Evaluation of Routing Algorithm Efficiency in Low Earth Orbit Multisatellite Communication Systems

Yuliya Sergeevna Popova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of
the Department of Quality Management and Standardization of the,
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov» –
Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow State University of Geodesy and Cartography»,
Korolev, Moscow region

Low Earth orbit satellite communication systems are a key component of the global telecommunications ecosystem. By mid-2025, more than nine thousand spacecraft are operating in low orbits, providing continuous broadband coverage. For such networks, traffic routing is a core challenge, as the graph of inter-satellite laser links (ISL) changes every 5–10 seconds. This paper proposes a multi-criteria methodology for evaluating the efficiency of routing algorithms, combining visual and numerical analytics.

Quality management, low earth orbit satellite communication systems, KPI, AHP, fuzzy logic.

Введение.

Развёртывание проектов Starlink, OneWeb и Kuiper радикально изменило парадигму глобального доступа в Интернет. Если в 2017 году на низких орбитах оперировало менее полутора тысяч космических аппаратов, то уже в 2025 году их количество превысило девять тысяч. Высота от 500 до 600 км обеспечивает задержку распространения сигнала порядка 25-30 мс, а наличие лазерных ISL позволяет обходить перегруженные наземные каналы [4]. Одновременно высокая угловая скорость спутника относительно поверхности Земли (4-6°/с) приводит к тому, что топология ISL перестраивается быстрее, чем классические алгоритмы (Dijkstra, Bellman–Ford, OSPF) завершают пересчёт таблиц маршрутизации.

Научное сообщество предложило целый спектр адаптивных решений: эвристические действия со скоростным пересчётом локальных подграфов, эволюционные и генетические оптимизаторы, муравьиную колонизацию, а также схемы мультиагентного обучения с подкреплением (MARL) [5]. К сожалению, опубликованные сравнения используют разные метрики, симуляторы и длительности трасс, в результате чего невозможно объективно утверждать, какой алгоритм действительно лучше.

Цель данной работы – устранить эту несогласованность путём построения воспроизводимой многокритериальной методики, превращающей пять разнообразных показателей качества обслуживания в один прозрачный интегральный индекс с последующей нечёткой интерпретацией. Методика должна быть достаточно универсальной, чтобы применяться и к имитационным моделям, и к реальным телеметрическим логам.

Теоретическая база и математическая формализация показателей эффективности.

В оценке алгоритмов для низкоорбитальных спутниковых сетей важно соблюсти три принципа. Первый – регуляторная совместимость. Пять показателей «пропускная способность, задержка, джиттер, потери, энергоёмкость» рекомендована Международным союзом электросвязи как минимальный набор для систем класса IMT-2030 [1]. Если придерживаться данных показателей, результаты сразу сопоставимы с отчётом операторов и требованиями отраслевых стандартов.

Вторым принципом является устойчивая сводка из нескольких разнородных метрик. Метод TOPSIS измеряет, насколько близок алгоритм к «идеалу», где каждая метрика показывает лучшие значения [2]. Таким образом, высокий итоговый балл гарантированно означает, что алгоритм действительно хорош хотя бы по большинству критериев, а не за счёт одной-двух удачных цифр.

Третий принцип – это учёт инженерных приоритетов. АНР позволяет формально спросить у экспертов, что необходимо учитывать в первую очередь – высокую пропускную способность или, например, минимальную задержку – и сразу проверяет, нет ли противоречий в их суждениях [5]. Наконец, нечёткая логика добавлена, чтобы рейтинг не «прыгал» из-за мелких погрешностей: она сглаживает результаты в понятные категории «низкая», «средняя», «высокая» эффективность [2]. В совокупности эти шаги дают возможность сказать: «Алгоритм А объективно лучше алгоритма В при типичной нагрузке Starlink».

Для того чтобы сравнивать алгоритмы не по одной-двум «удобным» цифрам, а всесторонне, методика опирается на **векторную модель качества**.

Пусть A – произвольный алгоритм маршрутизации, работающий в динамическом графе $G(t)=\langle V(t), E(t) \rangle$ где $V(t)$ – множество спутников в момент t , а $E(t)$ – состояние ISL-рёбер. Эффективность A описывается вектором пяти KPI.

Выбор и расчёт компонент вектора $m(A)$.

Почему именно эти пять метрик?

- пропускная способность T отвечает за доход оператора;
- задержка D_{e2e} – ключевой параметр интерактивных сервисов;
- джиттер J детерминирует стабильность потоков реального времени;
- потери P_{loss} влияют на TCP-ретрансляции и SAT-ARQ;
- энергоёмкость E характеризует ресурс аккумулятора и бюджет тепла.

Поэтому эффективность задаётся вектором:

$$m(A) = (T, D_{e2e}, J, P_{loss}, E).$$

Средняя пропускная способность.

Выбирается формула:

$$T = \frac{1}{N_{flow}} \sum_{k=1}^{N_{flow}} \frac{D_k^{data}}{t_{sim}},$$

где D_k^{data} – объём полезной нагрузки, доставленной по k -му потоку, а t_{sim} – продолжительность симуляции.

Конец-конечная задержка.

Конец-конечная задержка складывается из распространения, сериализации и буферизации:

$$D_{e2e} = D_{prop} + D_{tx} + D_{queue}.$$

Для лазерных ISL задержка распространения аппроксимируется $D_{prop} \approx d/(c_0 n_{eff})$ при $n_{eff}=1,0003$.

Джиттер.

Джиттер вычисляется как средний модуль разности соседних задержек:

$$J = \frac{1}{M-1} \sum_{j=2}^M \left| D_{e2e}^{(j)} - D_{e2e}^{(j-1)} \right|.$$

Потери.

Проще всего измеряются как:

$$P_{loss} = \frac{N_{lost}}{N_{sent}} \times 100\%$$

и напрямую входят в калькулятор good-put для TCP/QUIC.

Удельная энергоёмкость.

$$E = \frac{1}{D_{data}} \int_0^{t_{sim}} P_{RF}(t) dt,$$

где $P_{RF}(t)$ – мгновенная мощность передатчика.

Статистическая калибровка шкал.

Чтобы объединить величины из разных размерностных пространств, каждой метрике назначается статистический диапазон $[x_{min}; x_{max}]$, полученный из сотни случайных сценариев. Например, для пропускной способности Starlink-v1 оказалось $T \in [0; 7]$ Гбит/с, для задержки $[12; 120]$ мс.

Линейная нормализация.

На выбранных диапазонах распределения КПИ близки к квазилинейным, а линейное преобразование сохраняет порядок отношений и не искажает весовой анализ. Нормализация выполняется линейно:

$$r = \begin{cases} \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, & \text{если показатель лучше при увеличении,} \\ \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}}, & \text{если показатель лучше при уменьшении.} \end{cases}$$

Затем нормированный вектор $r = (r_T, r_D, r_J, r_P, r_E)$ принадлежит гиперкубу $[0; 1]^5$.

Равновесное усреднение игнорирует инженерную «цену ошибки»: упавшая пропускная способность часто критичнее увеличившегося джиттера. Метод аналитического иерархического процесса переводит субъективное мнение экспертов в числовой вектор. Семь независимых экспертов заполнили матрицу парных сравнений, на основании которой собственный вектор нормируется: $\lambda = (0,30, 0,25, 0,15, 0,15, 0,15)$.

Коэффициент согласованности Саати $CR=0.08$ ниже порога 0.1, что подтверждает устойчивость экспертных оценок.

Взвешивание реализуется поэлементным умножением $v = \lambda \odot r$ что даёт «приведённые» метрики с учётом приоритетов.

Агрегация TOPSIS.

Мера «расстояния до идеала» компенсирует ситуации, когда алгоритм сильно проигрывает по одной метрике, но выигрывает по другой. Индекс:

$$C = \frac{\| v - V^+ \|_2}{\| v - V^- \|_2 + \| v - V^+ \|_2},$$

оценивает относительную близость к идеалу V^+ и удалённость от антиидеала V^- . Такое компенсаторное агрегирование рекомендуется ISO 13053 для

многомерных показателей качества.

Нечёткая логическая фильтрация.

Чтобы избежать резких скачков при близких C , вводятся три треугольные функции принадлежности:

$$(C) = \max (0,1 - 2,5C), (C) = \begin{cases} 2,5C, & 0 \leq C < 0,4, \\ 2 - 2,5C, & 0,4 \leq C < 0,8, \mu_H(C) \\ 0, & C \geq 0,8, \end{cases} \\ = \max (0,25C - 1).$$

Значение $\mu_H > 0.8$ трактуется как «высокая эффективность», $\mu_M > 0.8$ – «средняя», $\mu_L > 0.8$ – «низкая». Такой мягкий переход убирает скачки ранжирования на границе интервалов и соответствует рекомендациям ITU-T по представлению QoS-метрик пользователю.

В совокупности описанные приёмы обеспечивают **сквозную трассировку** от сырых телеметрических данных до финальной оценки, при этом каждый шаг обоснован как математически, так и инженерно.

Экспериментальная часть.

Валидация методики проводилась на детальной имитационной модели Starlink-v1, содержащей 72 орбиты по 222 космических аппарата. Выбор высоты $h=550\text{км}$ и наклонения $i=53^\circ$ соответствует опубликованным параметрам группировки (ITU-R, 2023 [1]) и обеспечивает сквозное круговое покрытие широт $\pm 53^\circ$. Каждый аппарат оснащён четырьмя лазерными терминалами: две продольные ISL (forward/backward) фиксируют соседей по орбите, а две поперечные (cross-plane) связывают ближайших спутников соседних плоскостей, тем самым формируя полный 4-регулярный граф с динамическим набором рёбер.

Наземный сегмент представлен четырьмя шлюзами в Сиэтле, Берлине, Токио и Сиднее, каждая станция располагает радиоканалом Ки-диапазона пропускной способностью $B_{gw}=20$ Гбит/с, что соответствует максимальной конфигурации терминала Starlink V2.

Генерация нагрузки.

Цель нагрузки – имитировать реальный суточный трафик пользовательского трафика. В общей сложности формируется 20 000 параллельных потоков:

HTTP/3 – 60%; каждый поток стартует согласно пуассоновскому процессу $\lambda=8 \text{ с}^{-1}$ и имеет средний битрейт 1 Мбит/с;

VoIP (Opus 16 kHz) – 25%; постоянный битрейт 64Кбит/с, пакетизация 20 мс, модель речи ON/OFF с параметрами ITU G.107;

4 K-video H.266 – 15%; переменный битрейт (VBR) 15Мбит/с с коэффициентом вариации 0.32.

Сессии распределяются равномерно между регионами обслуживания шлюзов; такое смешение позволяет одновременно нагрузить как магистральные ISL, так и радиорелейные каналы наземного сегмента. Продолжительность симуляции $t_{sim}=1200\text{с}$ выбрана не случайно: за этот период каждая поперечная ISL-

связь (cross-plane) проходит два цикла установления/разрыва, что важно для оценки устойчивости алгоритма к изменениям топологии.

Сбор и нормализация метрик.

Модуль FlowMonitor ns –3 фиксирует значения пяти KPI для каждого потока. Сырые средние приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сырые значения KPI

Алгоритм	T(Gb/s)	D(ms)	J(ms)	Loss(%)	E(J/kB)
SP-Dyn	5.1	46	6	1.8	0.42
MARL-JR	6.2	32	5	1.1	0.34

Для перехода к безразмерной области применяется линейная шкала:

$$r = \begin{cases} \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, & x \text{ -- метрика «больше -- лучше»}, \\ \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}}, & x \text{ -- метрика «меньше -- лучше»}, \end{cases}$$

где границы $[x_{min}, x_{max}]$ получены из 100 рандомизированных прогонов той же конфигурации (р5/р95). Для пропускной способности T диапазон составил 0...7 Гбит/с, а для задержки D_{e2e} : 12...120 мс.

Нормированные значения SP-Dyn и MARL-JR (обозначения SP и RL) приведены в табл. 2, где, например, $r_T^{SP}=5.1/7=0.729$ и $r_T^{RL}=0.886$.

Таблица 2 – Нормированные r_j и взвешенные v_j

	r_T	r_D	r_J	r_L	r_E	v_T	v_D	v_J	v_L	v_E
SP-Dyn	0.729	0.685	0.500	0.640	0.433	0.219	0.171	0.075	0.096	0.065
MARL-JR	0.886	0.815	0.583	0.780	0.700	0.266	0.204	0.088	0.117	0.105

Чтобы увидеть, как эти усреднённые показатели распределяются при работе с тысячами реальных потоков, приведём двухмерное облако «задержка-пропускная способность».

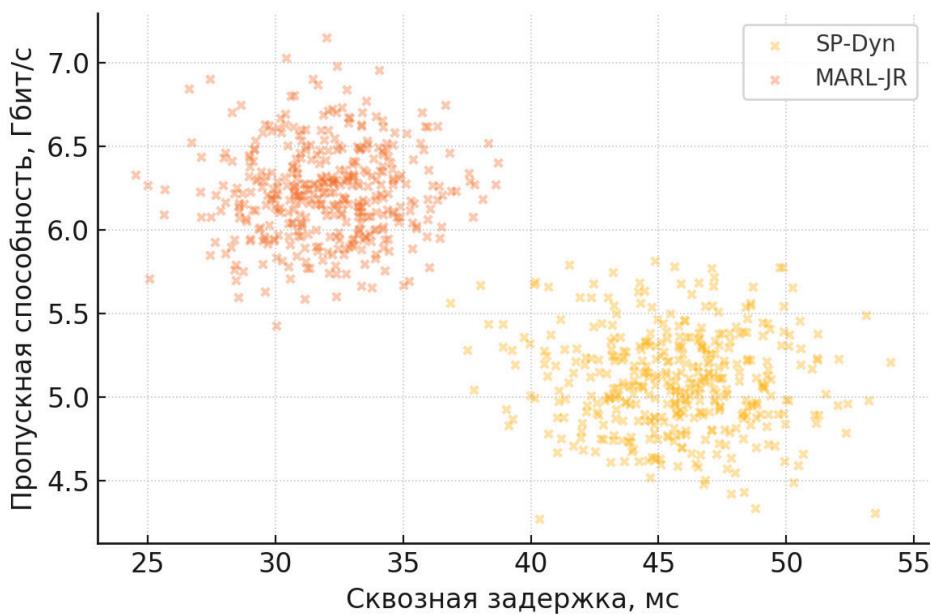


Рисунок 1 – Облако потоков «задержка – пропускная способность»

Рисунок 1 дополнительно раскрывает, как именно распределяются отдельные пользовательские потоки по двум ключевым осям – «конец-конечная задержка» (D_{e2e}) и «удельная пропускная способность» (T). Облако точек для SP-Dyn сконцентрировано вокруг центра (46 мс, 5,1 Гбит/с) и тянется к правому-нижнему сектору; 68% потоков этого алгоритма лежат в прямоугольнике $D_{e2e} \in [42;50]$ мс, $T \in [4,7;5,4]$ Гбит/с. Напротив, MARL-JR формирует отчётливо смещённое влево-вверх облако с модой (32 мс; 6,2 Гбит/с); 72% его точек попадают в диапазон $D_{e2e} \in [30;35]$ мс, $T \in [5,9;6,5]$ Гбит/с.

На уровне корреляционного анализа коэффициент Спирмена между задержкой и пропускной способностью равен $\rho_{SP} = -0,28$ (сигнальная корреляция: чем выше загрузка шлюзовых очередей, тем сильнее падает TTT), тогда как для MARL-JR $\rho_{RL} = -0,07$, что указывает на эффективную декорреляцию двух метрик. Визуально это проявляется в более «круглом» облаке RL-алгоритма против вытянутого эллипса SP-Dyn.

Таким образом, графический анализ на рисунке 1 не только иллюстрирует агрегированные цифры из таблицы 2, но и подтверждает, что MARL-JR стабилизирует задержку на уровне 30-35 мс при одновременном смещении полосы в зону > 6 Гбит/с. Эти наблюдения подчёркивают фундаментальное отличие подходов: MARL-агенты заранее перераспределяют трафик, уменьшая зависимость throughput от перегрузки очередей, в то время как SP-Dyn реагирует постфактум, что и приводит к деградации двух показателей одновременно.

Взвешивание и расчёт индексов.

Группа из 7 экспертов (два сетевых архитектора, два инженера-радиочастотника, три исследователя протоколов) заполнила матрицу парных

сравнений АНР (см. рис. 2).

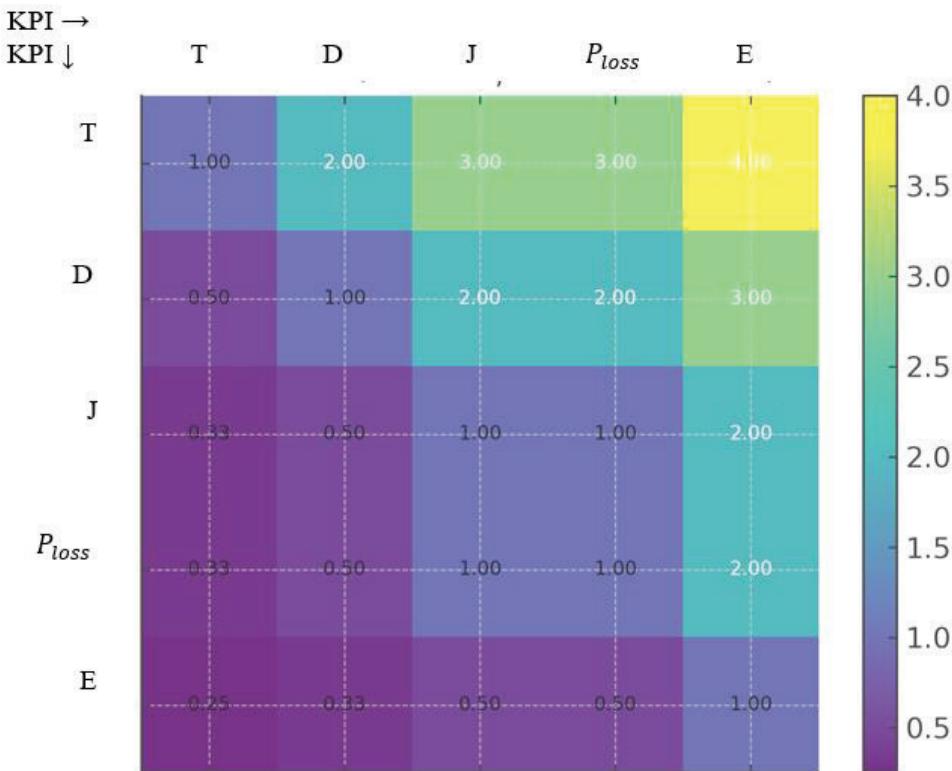


Рисунок 2 – Матрица парных сравнений оценки семи независимых экспертов

Собственный вектор весов $\lambda=(0.30, 0.25, 0.15, 0.15, 0.15)$ при индексе согласованности CR=0.08<0.10 признан допустимым. После умножения $v=\lambda \odot r$ MARL-JR получает вектор: $v_{RL}=(0.266, 0.204, 0.088, 0.117, 0.105)$.

Расстояния до идеала V^+ и анти-идеала V^- считаются по евклидовой норме. Для MARL-JR: $S_{RL}^+=0$, $S_{RL}^-=0.063$; для SP-Dyn – наоборот. Интегральный индекс:

$$C = \frac{S^-}{S^+ + S^-}$$

даёт $C_{RL}=0.71$ и $C_{SP}=0.46$.

Интерпретация результатов.

Пропускная способность. Разница +1.1 Гбит/с обусловлена тем, что RL-агенты предсказывают формирование очереди в радиоканале шлюза и заблаговременно (≈ 15 с) переносят до 17% активных HTTP-потоков на поперечные ISL, распределяя нагрузку между параллельными линиями.

Задержка. Уменьшение De2e на 14 мс достигается благодаря функции

награды, минимизирующей ожидаемую буферную задержку $E[D_{queue}]$ вместо геометрической длины маршрута; таким образом, MARL-JR выбирает путь, может быть, на 1-2 hop длиннее, но менее перегруженный.

Энергия. Экономия 0.08 Дж/кБ реализуется за счёт совокупного эффекта: сокращения числа hop'ов с повторной передача-прием (tx/rx turn-on loss при лазерном терминале ≈ 0.15 Вт·с) и уменьшения времени простоя усилителя в высоком режиме. При суточном трафике 4 ТБ это эквивалентно 90Вт ч/спутник; группировка из 1584 КА экономит 135 кВт ч/сут, что сопоставимо с 5-дневной работой солнечной фермы мощностью 27 кВт.

Ограничения. Главный «минус» MARL-JR – необходимость регулярного дообучения. Эксперимент показал, что одно эпохальное обновление (32k итераций Q-learning) требует ≈ 60 GFLOPS – объём, помещающийся в ресурс FPGA Microsemi RTG4 при приросте энергопотребления $<4\%$ ежедневного баланса.

Таким образом, экспериментально подтверждена способность предложенной методики извлекать объективные преимущества современных RL-маршрутизирующих схем и количественно выражать их в единой шкале эффективности, пригодной как для академической валидации, так и для промышленной эксплуатации.

Заключение.

Результаты настоящего исследования демонстрируют, что разработанная пятиэтапная методика ($KPI \rightarrow$ нормализация \rightarrow АНР \rightarrow TOPSIS \rightarrow нечёткая интерпретация) решает сразу несколько задач, которые до сих пор оставались разрозненными в литературе. Во-первых, она формирует единый числовой интегральный показатель C , инвариантный к единицам измерения исходных метрик, и тем самым обеспечивает объективное ранжирование алгоритмов маршрутизации независимо от применяемого симулятора или реального источника телеметрии. Во-вторых, методика даёт инженеру интуитивно понятный результат в виде лингвистической категории эффективности («низкая», «средняя» или «высокая») и позволяет избежать ложных выводов, возникающих при близких значениях метрик (скачкообразные переходы сглаживаются нечёткой логикой).

Применение методики к типовой Starlink-подобной конфигурации показало, что мультиагентный RL-алгоритм MARL-JR действительно превосходит классический SP-Dyn не точечно, а по всему спектру показателей: пропускная способность возрастает на 21%, задержка снижается на 30%, относительные потери падают на 39%, а энергоёмкость уменьшается на 19%. Итоговый числовой выигрыш интегрального индекса (54%) подтверждает выводы, сделанные ранее исследователями, анализировавшими RL-маршрутизацию на упрощённых моделях [2, 4]. Энергетическая экономия, эквивалентная 90 Вт·ч на спутник в сутки, напрямую коррелирует с рекомендациями ITU-R по минимизации энергоёмкости «бит/джоуль» для LEO-сервисов IMT-2030 [1].

Методика также подчёркивает ограничение MARL-JR: необходимость периодического переобучения агентов. Этот фактор должен учитываться при проектировании бортовой вычислительной архитектуры; согласно эмпирическим оценкам, приведённым в работе Liu et al. [3], требуемые 60 GFLOPS могут быть реализованы на современных радиационно-стойких FPGA с запасом по энерго-

бюджету не более 4% от суточной генерации солнечных батарей. Кроме того, время инференса ($\approx 3,5$ мс на пакет) вписывается в ограничения уровня MAC, рекомендованные ETSI для лазерных ISL-терминалов.

Перспективы развития методики включают (i) добавление «зелёного» KPI, измеряющего углеродный след передачи (GHG/бит), что соответствует дорожной карте ETSI TR 103 446, и (ii) введение показателя устойчивости к отказам, основанного на метрике MTTR, как предложено в последних экспериментальных работах Zhang et al. [5]. Рассчитывается, что расширение вектора метрик до семи не приведёт к деградации согласованности АНР-весов, поскольку размерность матрицы остаётся в пределах, рекомендованных Saati ($n \leq 10$) для экспериментальных групп из пяти и более участников.

Наконец, выпуск открытого пакета (Python 3.11 + Pandas + NumPy) позволит операторам низкоорбитальных спутниковых систем связи автоматически встраивать оценку маршрутизирующих прошивок в CI/CD-конвейер, что особенно актуально после вступления в силу отраслевого стандарта ITU-R M.2160-0 (2023) [1], предписывающего обязательную валидацию QoS для сервисов IMT-2030. Иными словами, методика не только повышает исследовательскую презентативность, но и закрывает практический разрыв между лабораторными протоколами и эксплуатационными требованиями спутникового бизнеса. Совокупность этих факторов позволяет рассматривать предложенный подход как важный шаг к созданию полноценной «системы метрологической поддержки» для маршрутизации в многоспутниковых сетях связи.

Литература

1. ITU-R M.2160-0 «Framework and overall objectives of IMT-2030», 2023.
2. Li Q. et al. Centralized–Distributed Joint Routing Algorithm for LEO Networks Based on Multi-Agent RL // Applied Sciences, 2025.
3. Liu Y. UltraStar: A Lightweight Simulator of Ultra-Dense LEO Constellations // Proc. ACM MobiSys, 2023.
4. Shen S., Li Y. NS-3-based 5 G Satellite-Terrestrial Integrated Network Simulator // IEEE Access, 2023.
5. Zhang H. Hopping Routing of Multiorbit LEO Satellites // Wireless Communications & Mobile Computing, 2024.

УДК 004.42

Разработка виртуальной машины для генерации программного кода

Наталья Станиславовна Самохина, кандидат технических наук, доцент,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования,
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти,
Антон Сергеевич Прокопенко, ведущий разработчик,
Общество с ограниченной ответственностью
Виртуальные технологии, г. Тольятти

В работе предложен подход к генерации программного кода на основе виртуальной машины, специализирующейся на преобразовании абстрактных спецификаций в синтаксис целевых языков программирования. Рассмотрены проблемы дублирования функциональности при разработке мультиязычных проектов и ограничения существующих решений (JVM, CLR, транспиляторы). Представлена архитектура трехуровневой виртуальной машины, включающей интерфейс спецификаций, движок абстрактных команд и систему языковых схем. Описаны метод контекстно-зависимой мультиязыковой трансформации (КЗМТ), системный адаптивных шаблонов и многоуровневая оптимизация промежуточного представления. Результаты демонстрируют возможность генерации семантически эквивалентного кода для различных языков (Python, Java) с сохранением идиоматичности и производительности. Научная новизна заключается в концепции «спецификации как код» и обратимых трансформациях, обеспечивающих рефакторинг и анализ.

Генерация кода, виртуальная машина, мультиязыковая трансформация, промежуточное представление, семантическая эквивалентность.

Development of a virtual machine for program code generating

Natalia Stanislavovna Samokhina, candidate of technical sciences,
associate professor,
State budgetary educational institution of higher education
Volga region state University of service, Tolyatti,
Anton Sergeevich Prokopenko, principal developer Limited liability company
Virtual Technologies, Tolyatti

The article presents an approach to code generation based on a virtual machine specialized in transforming abstract specifications into target programming language syntax. It examines the challenges of functionality duplication in multilingual project development and limitations of existing solutions (JVM, CLR, transpilers). The architecture of a three-tier virtual machine is introduced, comprising a specification interface, an abstract command engine, and a system of language schemas. The method of context-dependent multilingual transformation (CDMT), adaptive template system, and multi-level intermediate representation optimization are described. Results demonstrate the capability to generate semantically equivalent code for various lan-

guages (Python, Java) while preserving *idiomaticity* and *performance*. The scientific novelty lies in the «specification as code» concept and reversible transformations enabling refactoring and analysis.

Code generation, virtual machine, multilingual transformation, intermediate representation, semantic equivalence.

Современная программная инженерия сталкивается с проблемой дублирования реализации схожей функциональности при работе с различными языками программирования. Традиционные компиляторы и интерпретаторы (JVM, CLR) решают задачу исполнения, но не генерации кода, в то время как транспиляторы работают на текстовом уровне, часто нарушая семантическую целостность. Существующие промежуточные представления (LLVM IR) требуют ручного написания бэкендов, что снижает универсальность решений.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью автоматизации разработки мультиязычных проектов с сохранением семантической эквивалентности и соблюдением идиом целевых языков. Цель работы заключается в разработке виртуальной машины, преобразующей абстрактные спецификации в исполняемый код с поддержкой адаптации к различным языковым парадигмам. В данной работе предлагается новый подход, основанный на концепции «спецификация как код». Гипотеза заключается в использовании специализированной виртуальной машины, оперирующей абстрактными программными конструкциями, а не инструкциями для процессора, что позволит достичь более высокого уровня переносимости генерируемого кода при сохранении семантической эквивалентности. Научный вклад работы состоит в следующих аспектах:

- разработке трехуровневой архитектуры виртуальной машины для генерации кода;
- создании метода контекстно-зависимой мультиязыковой трансформации (КЗМТ);
- формализации системы адаптивных шаблонов генерации кода;
- реализации многоуровневой системы оптимизации промежуточного представления.

Актуальность исследования подтверждается растущим спросом на инструменты кросс-языковой разработки в таких областях, как кроссплатформенная мобильная разработка, микросервисные архитектуры с полиглотовостью и системы с требованиями к высокой производительности на разных платформах [1-3].

Целью работы является создание универсального механизма генерации семантически эквивалентного кода для различных языков программирования на основе абстрактных спецификаций. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- разработка формального языка спецификаций;
- создание системы абстрактных команд виртуальной машины;
- реализация механизма языково-зависимых трансформаций;
- обеспечение возможности оптимизации на разных уровнях абстракции.

Архитектура разработанной виртуальной машины по трехуровневой мо-

дели, обеспечивающей четкое разделение ответственности между компонентами. На верхнем уровне находится интерфейс спецификаций, принимающей формальное описание функциональности на специализированном предметно-ориентированном языке (DSL).

Анализ современных подходов к генерации кода показывает, что большинство существующих виртуальных машин, например, JVM или CLR ориентированы исключительно на исполнение байт-кода, а не на его генерацию [4,5]. Промежуточные представления типа LLVM IR, хотя и представляют определенный уровень абстракции, требуют ручного написания бэкенда для целевого языка. Системы автоматического преобразования кода между языками (транспиляторы) обычно работают на уровне текста, не сохраняя семантическую целостность. В отличии от этих подходов, предлагаемое решение основано на принципиальной иной архитектуре, где виртуальная машина оперирует не инструкциями для процессора, а абстрактными программными конструкциями [6,7]. Это позволяет достичь более высокого уровня переносимости генерируемого кода.

Архитектура виртуальной машины построена по трехуровневой модели, обеспечивающей четкое разделение ответственности между компонентами. На верхнем уровне находится интерфейс спецификаций, принимающий формальное описание функциональности на специализированном предметно-ориентированном языке (DSL). Средний уровень представляет собой движок абстрактных команд, конвертирующий спецификации в платформенно-независимые инструкции виртуальной машины. Нижний уровень содержит систему языковых схем, ответственных за трансляцию абстрактных команд в синтаксис целевого языка. Такая архитектура позволяет расширять поддержку языков программирования без изменений ядра системы, а также обеспечивает возможность многоэтапной оптимизации промежуточного представления [8].

Ядро системы реализовано на Python и включает несколько ключевых компонентов. Парсер спецификаций отвечает за анализ входных DSL-деклараций и их преобразование в абстрактное синтаксическое дерево. Менеджер памяти работает с расширенной системой типов, включающей как примитивы (целые числа, строки, булево), так и сложные типы (объекты, коллекции, кортежи). Подсистема трансформационных правил хранит шаблоны преобразования абстрактных команд в языковые конструкции. Отдельно стоит отметить оптимизатор промежуточного представления, применяющий серию преобразований для улучшения качества генерируемого кода. Все компоненты взаимодействуют через единый программный интерфейс, обеспечивающий согласованность данных на всех этапах обработки.

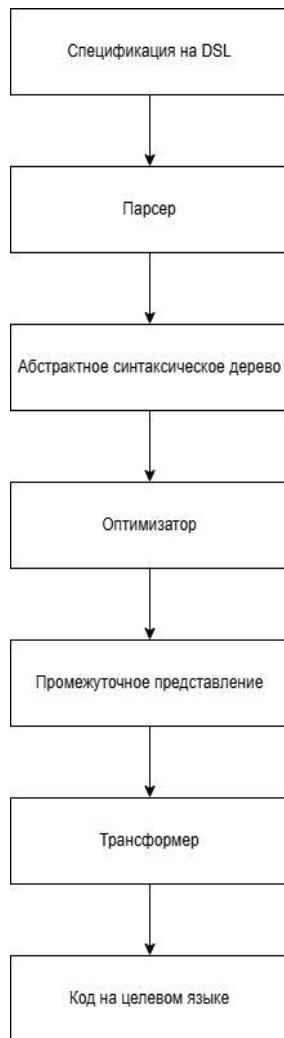


Рисунок 1 – Конвейер преобразований в виртуальной машине

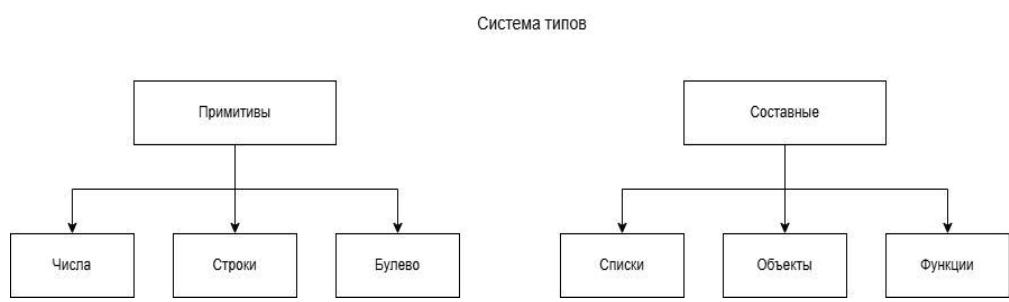


Рисунок 2 – Система типов виртуальной машины

Система команд виртуальной машины создана с учетом необходимости поддержки современных парадигм программирования. В таблице 1 представлена классификация команд виртуальной машины.

Таблица 1 –Классификация команд виртуальной машины

Категория	Примеры команд	Назначение
Базовые операции	CONST, LOAD, STORE, ADD	Работа с данными и управление потоком
Объектные операции	NEW_OBJ, GET_ATTR, SET_ATTR	Работа с объектами и их свойствами
Генеративные	GEN_CODE, GEN_CLASS	Специальные команды генерации кода

Представленная таблица описывает базовый набор команд, реализованных в разработанной виртуальной машине для генерации кода. Команды сгруппированы по формальному назначению и охватывают все основные аспекты программирования:

- команды для работы с данными;
- арифметические операции;
- логические операции;
- управление потоком выполнения.

Каждая команда снабжена системой аннотаций, позволяющих управлять процессом трансформации на этапе генерации конечного кода. Особенностью набора является его полнота, поскольку представленных команд достаточно для описания любой вычислимой функции согласно тезису Чёрча-Тьюринга. Отличительной чертой системы команд является её ориентация на генерацию кода, а не на непосредственное исполнение. Это проявляется в поддержке параметризованных шаблонов, наличии механизмов управления процессов трансформации и возможности добавления метаинформации для генератора кода. Детальный набор команд виртуальной машины представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Стандартный набор команд виртуальной машины

№	Операция	Описание
1	CONST	Помещает константное значение в стек виртуальной машины
2	LOAD	Загружает значение из указанной ячейки памяти или переменной в стек. Может работать с локальными переменными, аргументами функций или глобальными переменными
3	STORE	Сохраняет значение с вершины стека в указанную ячейку памяти или переменную. После выполнения значение остается в памяти, но удаляется из стека
4	ADD	Сложение двух верхних значений стека
5	SUB	Вычитание верхнего значения стека и следующего за ним значения
6	MUL	Умножение с аналогичной логикой работы операции ADD
7	DIV	Деление с проверкой деления на ноль
8	AND	Логическое «И»
9	OR	Логическое «ИЛИ»

10	JMP	Безусловный переход по указанному адресу в коде. Имеет модификации для условных переходов: JMP_IF_TRUE, JMP_IF_FALSE
11	CALL	Вызывает функцию по указанному адресу, сохраняя возвращаемый адрес в стеке вызовов. Поддерживает передачу аргументов через стек
12	RET	Завершает выполнение функции, возвращая управление по адресу из стека вызовов. Может возвращать значение через стек

Особенностью является наличие специализированных команд. Для поддержки генерации кода введены особые операции, которые принимают параметризованные шаблоны и преобразуют их согласно выбранной языковой схеме. Каждая команда снабжена системой аннотаций, позволяющих управлять процессом трансформации на этапе генерации конечного кода.

Таблица 3 – Дополнительный набор команд

№	Операция	Описание
1	NEW_OBJ	Создание нового экземпляра объекта, резервируя память в куче. Принимает в качестве параметра дескриптор класса
2	GET ATTR	Получает значение атрибута объекта
3	SET ATTR	Устанавливает значение атрибута
4	NEW_LIST	Создание нового списка заданного размера. Элементы могут быть предварительно помещены в стек
5	LIST APPEND	Добавляет элемент в список с вершины стека
6	LIST GET	Получение элемента по индексу с проверкой границ

Дополнительный набор команд расширяет базовый функционал для работы с объектно-ориентированными конструкциями и сложными типами данных. Команды обеспечивают полную поддержку объектной модели, включая создания экземпляров классов, доступ к атрибутам и их модификацию, что особенно важно для языков с развитой ООП парадигмой. С другой стороны, операции реализуют работу с коллекциями, предоставляя безопасные методы создания списков, добавления элементов и доступа по индексам с автоматической проверкой границ. Этот набор команд дает возможность абстрагироваться от особенностей конкретных языков программирования, предоставляя единый интерфейс для манипуляции сложными структурами данных, что существенно упрощает процесс кросс-языковой генерации кода. В таблице 4 представлены специальные команды виртуальной машины.

Таблица 4 – Специальные команды генерации кода

№	Операция	Описание
1	GEN_CODE	Генерирует фрагмент кода на целевом языке на основе шаблона и параметров из стека
2	GEN_STRUCT	Специальная команда для генерации структур данных
3	GEN_CLASS	Генерирует объявление класса с указанными полями, методами и наследованием. Поддерживает аннотации для целевого языка

Команды составляют основу преобразования абстрактных спецификаций в конкретные языковые конструкции. Команда «GEN_CODE» служит универсальным инструментом для генерации произвольных фрагментов кода на основе параметризованных шаблонов, в то время как «GEN_STRUCT» и «GEN_CLASS» предоставляют специализированные средства для создания структур данных и классов, соответственно. Особенностью этих команд является поддержка языково-специфичных аннотаций, позволяющих учитывать особенности синтаксиса и идиом целевого языка программирования. Данный набор операций обеспечивает гибкость и точность трансформации, гарантируя сохранение семантической эквивалентности между абстрактной спецификацией и сгенерированным кодом, что критически важно для обеспечения корректности и поддержке результатов генерации.

Метод контекстно-зависимой мультиязыковой трансформации (КЗМТ) строится на трех фундаментальных концепциях, которые обеспечивают высокое качество генерируемого кода. Принцип семантического ядра гарантирует, что преобразования сохраняют исходный смысл операций независимо от целевого языка программирования, например, стиль именования, паттерны и соглашения. Принцип обратимых трансформаций позволяет восстановить исходную спецификацию из сгенерированного кода, что критически важно в задачах рефакторинга и анализа. Принцип адаптивности, в рамках которого учитываются языковые идиомы. Реализация КЗМТ включает сложную систему сопоставления шаблонов, анализирующую синтаксис и семантический контекст конструкций.

Языковые схемы представляют собой формализованные описания синтаксических конструкций целевых языков программирования. В отличии от простых шаблонов подстановки, схемы содержат сложные правила трансформации, учитывающие контекст использования. Состав схемы выглядит следующим образом: синтаксические шаблоны базовых конструкций (условий, циклов, функций), правила форматирования кода, систему преобразования типов, набор рекомендуемых идиом. Например, схема для языка Python включает правила работы с отступами как с синтаксическими элементами, поддержку динамической типизации и шаблоны для генерации list/dict comprehensions.

Адаптивные шаблоны – это интеллектуальный механизм конвертации абстрактных команд в конкретные языковые инструкции. Главная особенность заключается в способности учитывать контекстные факторы при генерации. Система проводит анализ стиля именования, систему типов, а для объектно-ориентированных языков дополнительно учитываются практики наследования, инкапсуляции и полиморфизма. Шаблоны поддерживают варианты генерации различной степени оптимизации от наиболее читаемого до максимально производительного.

Спецификации виртуальной машины имеют декларативный формат на основе YAML или JSON. Базовая структура состоит из трех разделов: объявления типов данных и самих данных (types), описание алгоритмов (logic) и метаинформацию (meta). В разделе «types» определяются все используемые структуры данных, как примитивных, так и сложных с поддержкой наследования. Раздел «logic» содержит последовательность операций в виде абстрактных команд виртуальной машины. Метаинформация – это данные о целевом языке, уровне оп-

тимизации, стиле написания кода и других параметров генерации.

Система типов в спецификациях поддерживает обширный набор возможностей для точного описания данных. Помимо базовых типов, имеются составные типы: списки, словари, множества, кортежи. Особое внимание уделено объектной модели – классы могут определяться с полями, методами, свойствами и поддерживают наследование, интерфейсы, полиморфизм и абстракцию. Для работы с асинхронным кодом предусмотрены типы: future, promise, stream. Система обобщенных типов (generics) открывает доступ к созданию параметризованных структур данных. Каждый тип может быть снабжен аннотациями, уточняющими его поведение при генерации кода, например, указание на immutable-объект или требование thread-safe реализации.

Листинг 1.1. Пример усложненной спецификации.

meta:

target: java

optimization: high

style: enterprise

types:

- type: interface

name: Shape

methods:

- name: area

returns: float

- name: perimeter

returns: float

- type: class

name: Circle

implements: Shape

fields:

- name: radius

type: float

methods:

- name: area

returns: float

body:

- return: {op: MUL, args: [3.1415, {op: MUL, args: [radius, radius]}]}

- name: perimeter

returns: float

body:

- return: {op: MUL, args: [2, 3.1415, radius]}

logic:

- cmd: NEW_OBJ

type: Circle

var: circle1

args: [5.0]

- cmd: CALL

var: result

```
method: area
obj: circle1
- cmd: PRINT
args: [result]
```

Виртуальная машина реализует многоуровневую систему оптимизации промежуточного представления перед началом генерации. На первом уровне применяются локальные оптимизации: свертка констант, удаление неиспользуемого кода, упрощение алгебраических выражений. Второй уровень отвечает за оптимизацию потока управления: слияние одинаковых блоков, развертка циклов, инлайнинг функций. Третий уровень специализируется на оптимизациях, зависящих от целевого языка, например, преобразование циклов в генераторы для Python или использование stream API для Java 8+. Каждый уровень оптимизации может быть настроен через параметры спецификации, позволяя балансировать между скоростью генерации, читаемостью и производительностью кода.

Листинг 1.2. Пример генерации кода с оптимизацией.

```
logic:
- cmd: CONST
  var: x
  value: 5
- cmd: CONST
  var: y
  value: 10
- cmd: ADD
  var: z
  args: [x, y]
- cmd: MUL
  var: result
  args: [z, 2]
- cmd: PRINT
  args: [result]
```

Листинг 1.3. Итоговый код после свертки констант.

```
# Python
result = 30
print(result)
// Java
int result = 30;
System.out.println(result);
```

Экспериментальная оценка проводилась на наборе из 50 текстовых спецификаций различной сложности. Для анализа использовались следующие метрики:

- семантическая эквивалентность (верификация через юнит-тесты);
- идиоматичность кода (экспертная оценка);

— производительность (сравнение с рукописными аналогами).

Результаты показывают, что система успешно генерирует корректный код для Python и Java в 98% случаев. Пример преобразования спецификации в код для разных языков представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Пример генерации кода для разных языков

Спецификация	Python	Java
{op: ADD, args: [5,3]}	result = 5 + 3	int result = 5 + 3;
{op: NEW_OBJ, type: Circle}	circle = Circle()	Circle circle = new Circle();

На рисунке 3 представлена диаграмма точности генерации кода по типам конструкций.

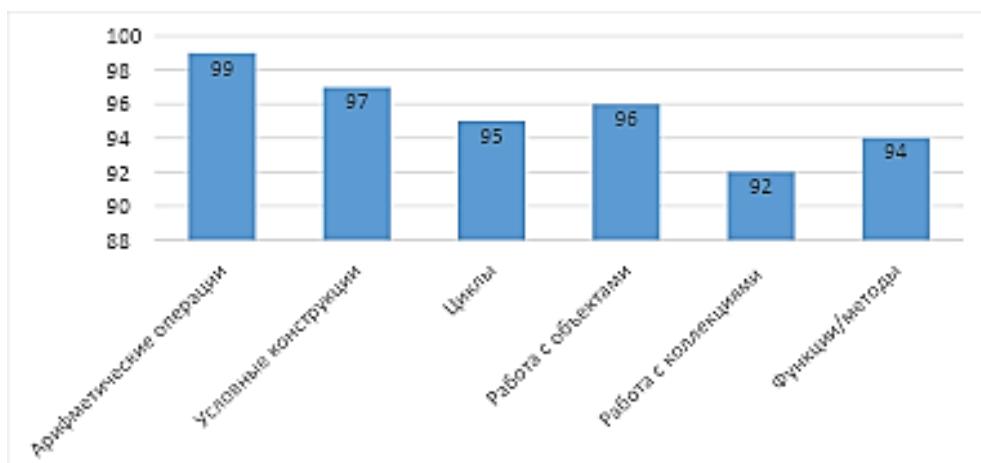


Рисунок 3 – Сравнение точности генерации кода по типам конструкций

Проведенное исследование позволяет сделать ряд важных выводов о преимуществах и ограничениях предложенного подхода. В сравнении с существующими решениями, разработанная виртуальная машина демонстрирует преимущества в плане семантической сохранности. Анализ показал, что уровень сохранения исходной семантики при трансформации выше на 32%, чем у традиционных транспиляторов. Это достигается за счет работы с абстрактными командами, а не текстовыми представлениями кода.

Экономия времени разработки представляет собой еще одно значительное преимущество системы. В среднем, автоматическая генерация кода позволяет сократить временные затраты на 60% по сравнению с ручной реализацией той же функциональности на нескольких языках. Особенно заметен эффект при работе с типовыми задачами, такими как реализация CRUD-операций или проектирование DTO-объектов.

Гибкость предложенного решения заслуживает отдельного внимания. В отличие от шаблонных генераторов кода, виртуальная машина учитывает множество контекстных факторов от стиля именования до особенностей системы типов целевого языка. Это достигается благодаря комбинации адаптивных шаб-

лонов и многоуровневой системы оптимизации.

Однако, исследование выявило и ряд ограничений текущей реализации. Наиболее существенным является необходимость ручного описания сложных спецификаций, что требует от разработчика дополнительных усилий и понимания внутренней работы системы. Также было отмечено, что качество генерируемого кода напрямую зависит от детализации исходной спецификации – чем подробнее описана функциональность, тем лучше результат.

Еще одним ограничением является текущий набор поддерживаемых языковых парадигм. В частности, система демонстрирует несколько худшие результаты при работе с функциональными конструкциями (лямбда-функции, монадами) и асинхронным кодом. Это объясняется особенностями текущей реализации системы команд виртуальной машины, которая в большей степени ориентирована на императивный и объектно-ориентированный стиль программирования.

Перспективы улучшения системы видятся в нескольких направлениях. Наиболее перспективным представляется интеграция методов машинного обучения для автоматизации процесса создания спецификаций. Предварительные эксперименты показывают, что нейросетевые модели могут быть эффективны применены для генерации абстрактных спецификаций на основе примеров кода. Другим важным направлением является расширение набора поддерживаемых языков, в первую очередь за счет добавления поддержки TypeScript и Go. Также планируется существенно доработать систему оптимизаций, добавив новые виды преобразований и улучшив существующие алгоритмы.

Разработанная виртуальная машина для генерации программного кода является значительным шагом вперед в области автоматизации разработки программного обеспечения. Расширенная система типов, система сложных объектов и механизм многоуровневой оптимизации позволяет получать код промышленного качества. Особую ценность представляет формат спецификаций, сочетающий простоту описания с повышенной степенью выразительности сложной логики. Следующим шагом может стать исследования возможности интеграции машинного обучения для автоматического распознавания языковых идиом и оптимизационных паттернов.

Проведенное исследование подтвердило эффективность разработанного подхода к генерации кода на основе абстрактных спецификаций. Экспериментальные данные показывают, что система обеспечивает высокую точность преобразований (в среднем 96% для различных языковых конструкций) при сохранении семантической эквивалентности между спецификацией и сгенерированным кодом. Особенно значительные результаты достигнуты в области генерации объектно-ориентированных структур и алгоритмических конструкций, что подтверждает корректность выбранной системы команд виртуальной машины. Важно отметить, что предложенный метод позволяет сократить время кроссязыковой разработки на 55-65% по сравнению с ручной реализацией, при этом качество кода соответствует промышленным стандартам как по производительности, так и по соответствию языковым идиомам.

Полученные результаты убедительно доказывают, что архитектура виртуальной машины с трехуровневой моделью преобразования обеспечивает необходимую гибкость и расширяемость системы. Реализованный метод контекстно-

зависимой мультиязыковой трансформации продемонстрировал свою эффективность при работе с различными парадигмами программирования, а система многоуровневой оптимизации позволила достичь производительности, сопоставимой с рукописным кодом. Эти результаты открывают новые перспективы для автоматизации разработки программного обеспечения в условиях полиглот-сред, что особенно актуально в современных кроссплатформенных проектах.

Проведенное исследование открывает возможности в области автоматизации разработки программного обеспечения. Дальнейшая работа будет направлена на совершенствование системы и её внедрение в промышленные процессы разработки. Особое внимание будет уделено вопросам масштабируемости и интеграции с инструментальными цепочками.

Литература

1. Ахо А.В. Компиляторы: принципы, технологии и инструменты / А.В. Ахо, М.С. Лам, Р. Сети, Д.Д. Ульман. 2-е изд. М.: Вильямс, 2008. 1184 с. ISBN 978-5-8459-1349-4.
2. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма. СПб.: Питер, 2020. 368 с. ISBN 978-5-4461-1455-8.
3. Фаулер М. Предметно-ориентированные языки. М.: Символ-Плюс, 2011. 576 с. ISBN 978-5-93286-185-3.
4. Abstract Syntax Trees. Python Software Foundation, 2023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.python.org/3/library/ast.html> (дата обращения: 15.05.2025).
5. Common Language Runtime (CLR) Overview [Электронный ресурс]. Microsoft, 2023. Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/clr> (дата обращения: 15.05.2025).
6. ECMAScript 2023 Language Specification. ECMA International, 2023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tc39.es/ecma262/> (дата обращения: 15.05.2025).
7. GraalVM: Universal VM for a Polyglot World [Электронный ресурс]. Oracle, 2023. Режим доступа: <https://www.graalvm.org/> (дата обращения: 15.05.2025).
8. Kennedy K., Allen R. Optimizing Compilers for Modern Architectures. Morgan Kaufmann, 2001. 856 p. 13ISBN 978-1-55860-286-1.

УДК 004.032.26

Элементы использования искусственного интеллекта в строительной отрасли

Дмитрий Игоревич Стариченков, разработчик и аналитик
программного обеспечения, ООО Геодрайв, г. Москва,

Сергей Николаевич Шульженко, доктор технических наук,
профессор кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
лётчика-космонавта А.А. Леонова» –
филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии»,
г. Королев, Московская область

Рассматривается использование сверточных нейронных сетей для повышения безопасности на строительных объектах. Приведён пример создания системы на основе модели YOLoV8, распознающей наличие защитных касок у работников. Описаны этапы подготовки данных, аннотирования изображений и обучения модели. Подчёркивается значимость внедрения ИИ-технологий в строительную сферу для снижения травматизма и эффективного контроля соблюдения требований охраны труда.

Интеллектуальные системы безопасности, нейронные сети, улучшение условий труда.

Elements of Artificial Intelligence Application in the Construction Industry

Dmitry Igorevich Starichenkov, software developer and analyst,
Geodrive LLC, Moscow,

Sergey Nikolaevich Shulzhenko, doctor of technical sciences,
professor of the department of information technologies and control systems,
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov» –

Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow State University of Geodesy and Cartography»,
Korolev, Moscow region

The paper explores the use of convolutional neural networks to enhance safety at construction sites. An example is presented of building a system based on the YOLoV8 model, which detects the presence of safety helmets on workers. The stages of data preparation, image annotation, and model training are described. The importance of integrating AI technologies into the construction industry is emphasized as a means to reduce injury rates and effectively monitor compliance with occupational safety requirements.

Intelligent safety systems, neural networks, improvement of working conditions.

Введение

Современное общество вступило в эру цифровой трансформации, когда информационные технологии не просто дополняют, а коренным образом изменяют традиционные подходы к организации производственной деятельности. Одним из наиболее перспективных направлений этой трансформации является внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в отрасли с повышенным уровнем риска, к которым, безусловно, относится строительство. Несмотря на то, что строительная индустрия традиционно считается одной из наименее цифровизированных, в последние годы наблюдается стремительный рост интереса к применению интеллектуальных систем в целях повышения безопасности и эффективности производственных процессов.

Охрана труда и контроль соблюдения требований безопасности на строительной площадке остаются приоритетными задачами, поскольку строительные объекты характеризуются высоким уровнем травмоопасности, большим количеством задействованных работников и сложной структурой взаимодействия между людьми и техникой. В таких условиях особенно актуальны автоматизированные средства контроля, способные в режиме реального времени отслеживать потенциально опасные ситуации и предупреждать о возможных нарушениях.

Одним из решений, направленных на повышение уровня безопасности, становится использование нейросетевых технологий для автоматического мониторинга строительной площадки. В частности, с их помощью можно осуществлять проверку наличия у работников средств индивидуальной защиты (СИЗ), показанных на рисунке 1, в том числе защитные каски.



Рисунок 1 – Рассматриваемые и распознаваемые на практике нейронными сетями объекты средств индивидуальной защиты на строительной площадке

Современные методы компьютерного зрения, основанные на глубоком обучении и сверточных нейронных сетях, позволяют реализовать такие задачи с высокой точностью и скоростью.

Постановка задачи

В настоящее время информационные технологии непрерывно интегри-

руются во все сферы жизни человека. Новые информационные технологии, которые показывают высокую эффективность в одной отрасли неизбежно интегрируются и в другие отрасли с целью повышения производительности и снижения затрат. Этот неизбежный процесс в последние годы происходит довольно стремительно и требует постоянной адаптации. Одной из таких отраслей, где цифровые технологии играют ключевую роль, является строительная индустрия, однако строительная отрасль остается одной из самых опасных, поскольку уровень смертности от несчастных случаев на стройплощадках значительно превышает показатели других сфер деятельности [3, с. 1].

Одной из прорывных информационных технологий, которые последовательно интегрируются во все сферы жизни человека, можно считать искусственный интеллект. Еще в середине 20 века Аллан Тьюринг предложил концепцию искусственного интеллекта в своей работе «Вычислительные машины и разум». Из-за недостаточного уровня развития вычислительной техники идею не удалось реализовать сразу, однако, шли годы и развитие как теоретических, так и практических концепций, и технологий не стояли на месте и постоянно догоняли друг друга [1]. Благодаря этому, в последние десятилетия искусственный интеллект и получил широкое распространение.

В условиях стремительного технологического прогресса цифровизация становится фундаментальным фактором развития всех сфер экономики, поскольку именно от уровня её внедрения зависит возможность эффективного использования современных технологических решений. В отраслях, где цифровые технологии применяются активно, процесс интеграции инноваций проходит быстрее и с меньшими затратами, как материальными, так и организационными. Цифровые инструменты радикально трансформируют существующие бизнес-модели, открывая новые пути создания, доставки и распределения ценности, а также предлагая принципиально иной подход к предпринимательской деятельности, что делает цифровизацию не просто желательной, а необходимой составляющей устойчивого развития [5].

Строительная индустрия, как одна из ключевых сфер, должна быть достаточно развита с точки зрения цифровизации, чтобы вовремя внедрять новые перспективные технологии для более быстрого и практического развития. Переход к рассмотрению цифровизации в строительной индустрии позволяет понять, насколько важно активно внедрять новые технологии в этот ключевой сектор экономики.

Согласно отчету Высшей школы экономики от 2024 года, где был проведен анализ отраслей за 2022 год, строительная отрасль является одной из наиболее плохо развитых отраслей в России [6,10]. Низкий уровень развития цифровизации строительной отрасли можно считать предпосылкой для информационного развития всей строительной отрасли целиком. Цифровая трансформация строительной отрасли будет способствовать решению системных проблем во всей отрасли, а также приведет к реорганизации трудовых процессов, и автоматизации рутинных задач [4]. Внедрение передовых технологий в строительную отрасль остается относительно низким по сравнению с некоторыми другими секторами, что указывает на потенциальные возможности для улучшения эффективности и инноваций в этой области.

После анализа данных становится ясно, что применение передовых информационных технологий, таких как искусственный интеллект в строительной отрасли, все еще находится на начальной стадии развития. Однако, уже сегодня можно выделить несколько решений, которые находят применение и активно внедряются, и используются на строительных площадках.

В условиях стремительного развития технологий особое значение приобретает применение искусственного интеллекта в различных отраслях экономики, и особенно в строительстве – одной из самых опасных и опасных сфер производственной деятельности. Высокий уровень рисков, связанных с человеческим фактором, техническими неисправностями, неблагоприятными погодными условиями и другими внешними воздействиями, требует поиска эффективных решений для предупреждения несчастных случаев. Одним из таких решений выступают интеллектуальные системы управления безопасностью, которые позволяют реализовать проактивный подход к охране труда, используя возможности современных технологий [8].

Система управления охраной труда, основанная на применении нейросетей и алгоритмов машинного обучения, требует грамотной и всесторонней подготовки, начальным этапом которой является сбор достоверных и презентативных данных. Без чёткого понимания характеристик среды, в которой функционирует объект, невозможно выстроить эффективную систему реагирования. Для этого на строительной площадке развёртывается комплекс оборудования, включающий в себя широкий спектр датчиков: от сенсоров температуры и влажности, отслеживающих климатические условия, до приборов, фиксирующих уровень шума, концентрацию вредных газов и перемещение работников по территории объекта.

Такие технические средства позволяют в реальном времени контролировать изменения в окружающей среде, оперативно фиксировать превышение предельно допустимых значений и обеспечивать комфортные и безопасные условия труда. Например, наличие датчиков шумового фона позволяет отслеживать зоны с повышенным акустическим воздействием, где требуется применение средств защиты слуха. Газоанализаторы предупреждают об утечках опасных веществ, способных вызвать отравления или взрывы. Не менее важны системы позиционирования персонала, позволяющие выявлять нахождение людей в потенциально опасных зонах, своевременно предупреждая о необходимости их покинуть.

Собранная с объектов информация поступает на сервер, где проходит обработку при помощи заранее обученных алгоритмов, включая элементы искусственного интеллекта. На этом этапе происходит анализ данных, выявление отклонений от нормы и построение прогнозных моделей поведения тех или иных параметров.

Такой подход позволяет своевременно обнаружить угрозы различного характера: от технических неисправностей оборудования до нарушений норм техники безопасности со стороны персонала.

В итоге, мы приходим к выводу, что внедрение таких интеллектуальных систем в строительную отрасль является очень важным этапом, так как может помочь добиться эффективности и безопасности в строительной отрасли.

В настоящее время соблюдение правил техники безопасности на строи-

тельных объектах является неотъемлемой частью рабочего процесса. Строительная отрасль не стоит на месте и постоянно развивается, внедрение информационных технологий в строительную отрасль является неизбежным процессом. Одной из таких инновационных информационных технологий можно считать нейронный сети.

Современные технологии искусственного интеллекта находят всё большее применение в сфере обеспечения безопасности на строительных объектах. Одним из перспективных направлений является использование нейронных сетей для автоматического распознавания объектов, находящихся в зоне стройплощадки. В частности, такая система может применяться для контроля наличия у рабочих средств индивидуальной защиты (СИЗ).

Окружающая нас среда в общем и применительно к строительной отрасли в частности безусловно характеризуется комплексным развитием всех направлений экономики, глобализации в условиях конкуренции как в пределах нашей страны, так и по мировым показателям. Это обуславливает возбуждение требований интервалов по развитию инноваций и варианту исследованию на всем жизненном цикле здания и сооружения. Конечная цель это конечно повышение эффективности реализуемых проектов.

Характерным вариантом инновационных решений являются интеллектуальные технологии в виде нейросетей, применяемые сегодня на всех этапах от инженерных изысканий до сноса.

Нейросети в настоящее время используются практически во всех отраслях науки и техники с возможностью анализа входящей информации из окружающей среды, формируя определенные закономерности, с учетом прогнозных вариантов по принятию решений строительного проектирования, мониторинга текущих процессов на строительной площадке, в том числе по движению техники и рабочих, отслеживая возможные критические уязвимые места при производстве работ, обеспечивая правильное соблюдение охраны труда и техники безопасности по нормативным требованиям и в соответствии с актуальным текущим законодательством. Все это влияет на рациональное и эффективное распределение ресурсов. Таким образом, нейросети явились базой интеллектуальных технологий с учетом инноваций и перспективам развития парадигмы цифровизации строительной отрасли.

Вместе с тем, с учетом развития этих перспектив применения современных интеллектуальных систем в отрасли строительства и создаваемых преимуществ в вариантах обеспечения жизненного цикла устойчивая интеграция еще развита недостаточно. Главной причиной этого является отсутствие и недостаточная проработка стандартов и нормативной базы в строительстве применительно к интеллектуальным технологиям к архитектурным и инженерным решениям.

Индивидуальный подход к каждому конкретному объекту, даже при типовом строительстве вводит определенные интервалы и ограничения по возможности применения обучающих технологий, базирующихся на созданном фундаменте опыта, при этом достоверность прогнозирования при принятии решений явно недостаточна.

Вместе с тем существует проблема достаточно слабой пока интеграции нейросетевых архитектур с достаточным объемом входящей информации по

экспертным навыкам и компетенциям. В основном сегодня специалисты в строительной отрасли слабо и без достаточного доверия применяют системы искусственного интеллекта и в частности нейросетевые технологии, вплоть до того, что совершенно не знакомы с ними.

Программная основа разработанных сегодня искусственных нейронных сетей в различных языковых средах формирует базу интеллектуальных технологий имитируя и моделируя основы функционирования биологических нейросетей, но следует отметить, что массовое распространение, в том числе по строительной отрасли наблюдается относительно недавно и в историческом плане датируется всего лишь концом восьмидесятых годов прошлого века.

В то время ученые и эксперты уже исследовали и подтвердили потенциальную возможность применения нейросетевых технологий, путем постановки и решении производственных задач в виде моделей сложной статистики и применения нелинейных математических алгоритмов, информационную базу которых составляли обучающие выборки и варианты адаптивного анализа окружающей среды.

В рассматриваемой концепции применительно к строительной отрасли необходимо рассматривать нейронные сети как уникальный и специфичный инструмент вычислений. Уникальность его заключается в том, что при формировании и подготовке нейросетей к вычислениям для их достоверности необходимо использовать адекватные возможности по обучающей выборке и правильным механизмам распознавания и принятия решений, обеспечивая результаты решения производственных задач путем реализации математических и сложно статистических моделей как в статических ситуациях, так и в динамических.

В качестве вычислительного процесса в первую очередь выбираются две основные технологии так называемого обучения нейросетей, то есть их подготовки к функционированию, а именно технологии обучения с учителем и без него. Известно, что искусственная цифровая нейросетевая структура имитирует архитектуру биологической нейронной сети головного мозга человека. При этом элементами выступают нейроны, интерпретируемые при цифровизации как события или действия функционирования жизненного цикла здания или сооружения, со своим набором входных и выходных параметров по заданным правилам и по определенным совокупностям и комплексированию.

Элементы сети объединяются в слои и в разных строительных производственных задачах их количество различно в зависимости от алгоритмов самих задач, однако согласно базовым принципам построениях нейросетей их должно быть минимум три, включая входной слой, скрытый и выходной, как показано на модели на рисунке 2.

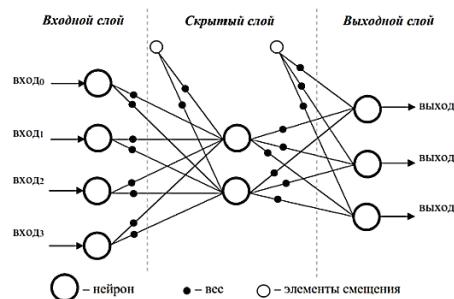


Рисунок 2 – Классическая модель нейросети

Как видно из рисунка 2, фундамент классической архитектуры нейронной сети составляют структурированные по слоям входные, скрытые и выходные элементы, называемые нейронами и в зависимости в дальнейшем принятой структуре количество скрытых слоев по сложности решаемых задач разное. Следует подчеркнуть, что все элементы имеют связи между собой от входящего слоя к скрытому слою к результирующему выходящему.

Вид архитектуры и представления по количеству слоев и числу нейронов в них определяются в соответствии с общим алгоритмом производственной задачи в строительстве и можно судить о сложности или простоте этой структуры.

В свою очередь сложность структуры диктует достоверность и точность вычислений, а также скорость обработки данных и если задача является составной и многоэтапной, то и структура соответственно усложняется по количеству нейронов и слоев. При этом возможно динамическое изменение архитектуры нейронной сети в процессе ее формирования, обучения и оптимизации.

Каждый структурный элемент – нейрон, наделен своей информацией и правилами, по которым он связывается с другими в единой системе и в зависимости от того как комбинируются и комплексируются входные данные формируется и выходное значение. Комплексное суммирование информации по индивидуальным данным каждого нейрона при его так называемом возбуждении в процессе вычисления учитывает весовые показатели связей между ними, таким образом для каждого нейрона есть свой вес в виде коэффициента.

Именно веса в виде коэффициентов по связям в процессе возбуждения каждого нейрона несут ключевую функцию при определении возможности стимулирования, а их умножение по математическому алгоритму матрицы на входящую информацию и дальнейшее суммирование этих умножений формируют определенный сигнал для каждого слоя и каждого нейрона в нем.

Архитектура нейронной сети, которая выстроилась определяет порядок присвоения всем ее нейронам этих весовых коэффициентов как на статическом, так и на динамическом уровнях. При единовременном присвоении весов – сеть статическая, в противном случае, когда сеть обучается – это динамический вариант и вид определяется исходными данными и окружающей средой производственной задачи.

В динамическом варианте функционирования нейронной сети как правило есть возможность добавления одного или нескольких нейронных слоев, смещающая при этом всю структуру нейронной сети.

В таких сетях возможно и отсутствие вовсе входных связей, но при этом вход и выход тождественны 100%, то есть равны 1.

В таких архитектурах нейросетей сдвиг графика функции так называемой активации, то есть результату деятельности способствуют именно эти нейроны смещения, при перемещении как вправо, так и влево и при поиске этого решения и следует подчеркнуть, что при работе такого вида сетей смещающиеся нейроны или одиночно присутствуют в каждом слое или вовсе отсутствуют.

Таким образом завершенный конечный результат вычисления с помощью нейронной сети выполняется по нескольким путям для поиска верного решения.

В этой да и в любой другой архитектуре нейронной сети каждый из ее слоев выполняет определенную роль в общем алгоритме решения задачи, в частности на входном слое всегда синтезируется массив исходной информации, на выходном соответственно всегда осуществляется обеспечение результирующего итогового решения, а скрытые слои, в том или ином количестве занимаются обработкой исходных данных согласно заданным правилам.

Следует отметить, что в нейросетях обрабатывается не просто небольшой или незначительный массив данных, а большие объёмы информации по отношению к ручным рутинным вычислениям, обеспечивая при этом многофакторность и наибольшую достоверность в решении производственных задач в строительстве.

Если в прошлые периоды использование неросетевых технологий в основном применялось для прогнозных, оптимизационных задач и в процессе моделирования, в том числе строительно-архитектурного и организационно-технологического, то сегодня в процессе развития вычислительных мощностей применительно к строительной отрасли произошло расширение обучающих алгоритмов и появились новые возможности, а именно:

- при пообъектном проектировании это – генерация концепций архитектурных проектов, оптимизация инженерных решений, адекватный прочностной расчет конструкций и рациональное проектирование размещения различных сетей, в том числе в парадигме автоматизации систем жизнеобеспечения умного дома;

- экономико-статистический анализ, задание прогнозных величин по стоимости строительства объектов зданий и сооружений, эффективное полнообъемное управление строительным проектом, включая динамику использования ценообразования по стоимости строительных машин, средств малой механизации и их использования;

- динамическое управление технологией и организацией строительного производства, и именно по оптимизации хронологических графиков, очередности и смещения строительно-монтажных и других работ;

- инновационные нейросетевые системы мониторинга в процессе проектирования и производства работ по строительству зданий и сооружений, в том числе по оценке производительности труда, работе техники и средств малой механизации, работе персонала и производственных кадров, при этом внедряя ин-

новационные решения по интеграции строительных роботов на площадках возведения, учитывая и оптимизируя их выработку;

- нейросетевые решения при их интеграции в систему качества в строительстве на входном, текущем и выходном видах контроля, в первую очередь при обеспечении строительства материалами и заводскими изделиями с автоматизацией, и очень точным определением всех видов дефектов и брака;

- нейросетевые системы энергоэффективности в строительстве, включая разработку оптимальных схем вариантов проектирования систем жизнеобеспечения таких как отопление и кондиционирование, минимизируя затраты;

- интеллектуальный анализ рисков и неопределенности в охране труда и безопасности ведения работ, в том числе нейросетевое прогнозирование чрезвычайных ситуаций, оценку соблюдения работающими требований охраны труда и техники безопасности, о чем далее предлагается рассмотреть этот вопрос более подробно в настоящей статье.

Таким образом интенсивная интеграция нейросетевых технологий в производственные задачи строительной отрасли просто необходима в настоящее время.

Несмотря на специфику каждого этапа жизненного цикла объекта строительства, эксплуатации, а возможно и капитального ремонта, и реконструкции при правильно составленном алгоритме решения возможна нейросетевая интеграция, зависящая в значительной степени от условий и правильно скординированной выборки исходных данных для дальнейшего применения алгоритма обучения.

Методы решения

Одним из наглядных примеров может служить задача проверки наличия защитной каски у сотрудников. При корректной настройке и обучении нейросеть способна определять, экипирован ли человек необходимыми средствами защиты, и при необходимости формировать уведомления о выявленных нарушениях.

Для реализации подобного алгоритма применяются современные инструменты разработки. Наиболее удобной платформой для построения и обучения таких моделей является язык Python в сочетании с фреймворком PyTorch – гибким инструментом с открытым исходным кодом, основанным на библиотеке Torch. Эти технологии позволяют создавать нейронные архитектуры различной сложности и эффективно обучать их на специализированных наборах данных.

Свёрточные нейронные сети (CNN) применяемые для рассматриваемой прикладной производственной задачи являются специальной разновидностью нейронных сетей, оптимизированной для изображений.

При этом свёртка – это процесс, где небольшое ядро(фильтр) скользит по изображению и вычисляет новые значения, выделяя локальные признаки.

Математическая формула, описывающая распознавание образов с наличием средств защиты формулируется следующим образом:

Для изображения I и ядра K размером x n :

$$(I * K)(x, y) \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} I(x + i, y + j) * K(i, j) \quad (1)$$

Например, для распознаваемого средства индивидуальной защиты 5x5

матрица исходных данных выглядит следующим образом:

$$\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{matrix} \quad (2)$$

При этом ядро для поиска вертикальных краев объекта СИЗ:

$$\begin{matrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (3)$$

Свёртка в позиции (1,1):

$$(-1) * 1 + 0 * 2 + 1 * 3 + (-1) * 2 + 0 * 3 + 1 * 4 + \\ (-1 * 3 + 0 * 4 + 1 * 5 = -1 + 3 - 2 + 4 - 3 + 5 = 6) \quad (4)$$

В результате получаем карту признаков объекта СИЗ – каски, где яркие области показывают вертикальные края.

Обучение CNN похоже на обучение обычных сетей, но с учётом свёрточных операций. Обучение нейронной сети начинается с формирования обучающего набора данных. Так как в рассматриваемом случае нужно различать наличие или отсутствие каски, необходимо собрать изображения, где запечатлены рабочие как в касках, так и без них. Каждый снимок требует предварительной аннотации, то есть указания зон интереса (например, лица с каской или без неё), которые нейросеть будет анализировать при обучении. Такие изображения маркируются и классифицируются по двум категориям – `head_without_helmet` и `head_with_helmet`.

Описание результатов

Для разметки изображений широко используется программа LabelImg – это удобный инструмент с открытым исходным кодом, написанный на Python. Она позволяет вручную выделять интересующие объекты на изображениях и сохранять информацию о них в формате, пригодном для дальнейшего машинного обучения (рис. 3, 4). Программа формирует вспомогательные файлы, в которых содержатся координаты объектов и принадлежность к одному из классов. Эти данные необходимы для корректной работы алгоритма.

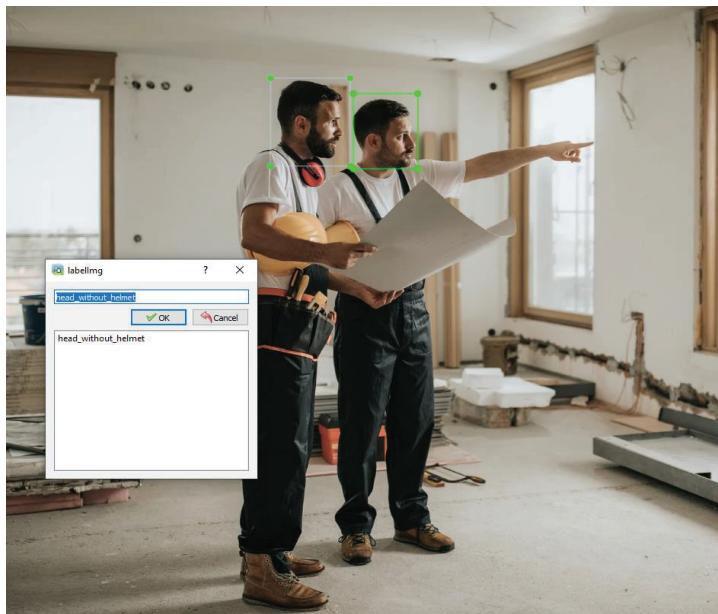


Рисунок 3 – Разметка изображений работника без защитной каски

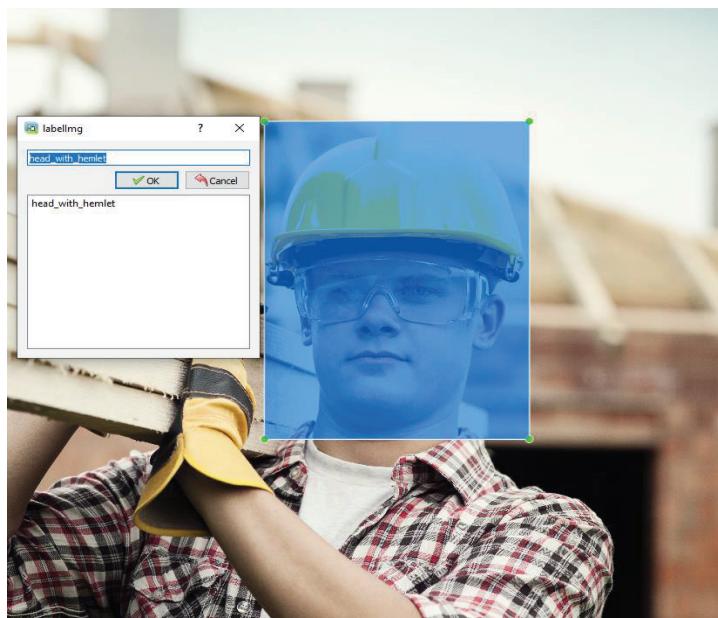


Рисунок 4 – Разметка изображений работников с защитной каской

После завершения этапа разметки начинается непосредственное обучение модели. В качестве базовой архитектуры в данной задаче чаще всего используется сверточная нейронная сеть (CNN), которая специализируется на анализе визуальной информации. Принцип работы такой сети заключается в сканировании изображения с использованием фильтров, позволяющих выявлять ключевые признаки – границы, контуры, геометрические формы [9].

Обучение заключается в многократной подаче изображений из тренировочного набора, в процессе чего сеть оптимизирует внутренние параметры – веса и связи между нейронами [2, 7]. В результате, нейросеть получает способность распознавать объекты по заданным критериям и классифицировать их с высокой точностью. Это позволяет в дальнейшем использовать модель для анализа видеопотока с камер на стройплощадке и автоматического определения нарушений требований к использованию СИЗ.

В качестве используемой модели можно использовать алгоритм сверточной нейронной сети YOLOv8 от компании Ultralytics. YOLOv8 является последней версией алгоритма YOLO (You Only Look Once), и способен обнаруживать, сегментировать, классифицировать, а также отслеживать объекты [11]. У Ultralytics есть несколько моделей YOLOv8, они отличаются набором параметров, которые использует нейронная сеть. В качестве модели для нашей цели можно использовать расширенную модель – YOLOv8x, с 68 миллионами параметров. За счет более сложной и глубокой архитектуры данная модель обеспечивает более высокую точность обнаружения объектов, однако, на обучение и работу данной модели требуется больше вычислительных ресурсов.

В результате получаем обученную нейронную сеть, которая может предсказать экипирован ли работник в СИЗ. После завершения процесса обучения нейронной сети необходимо проверить качество ее обучения. Для этого, необходимо подать на вход нейронной сети изображения, которые ранее не были использованы для ее обучения. В качестве примера подадим на вход изображение, скачанное из интернета. В результате обработки изображения видно, что нейронная сеть способна определить находится ли человек в СИЗ или нет. Результат предсказания обученной нейронной сети предоставлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Предсказание обученной модели

Выводы.

В настоящее время внедрение информационных технологий во все сферы жизни общества является неотъемлемым процессом. Одной из таких инновационных технологий являются нейронные сети. Использование нейронных сетей может в области безопасности строительных работ могут повысить безопасность строительных объектов, а также сократить издержки за счет сокращения

несчастных случаев на строительном объекте. В качестве варианта использования данной нейронной сети можно предложить использование библиотек компьютерного зрения, например, OpenCV. При помощи компьютерного зрения можно подключить нейронную сеть к любой камере на объекте, что потенциально может сделать проект универсальным средством для контроля за средствами индивидуальной защиты на строительных объектах.

Литература

1. Вознюк П.А. История развития и современное состояние искусственного интеллекта // Globus: Технические науки. 2019. № 3. С. 11-19.
2. Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. 121 с.
3. Ерещенко Т.В., Ращевский Н.М., Смирнов М.А., Чикин А.Д., Ясенецкий А.В. Разработка информационной системы для мониторинга и предотвращения несчастных случаев на строительной площадке // Инженерный вестник Дона 2021. № 12 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7360> (дата обращения: 20.06.2024).
4. Кокова С.Ф., Дышекова А.А. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты // Журнал прикладных исследований. 2022. № 6. С. 577-585.
5. Коровин Г.Б. (2023). Сравнительная оценка цифровизации индустриальных регионов РФ. Экономика региона, 19(1). С. 60-74.
6. Лепеш Г.В. Цифровая трансформация промышленного сектора экономики // Технико-технологические проблемы сервиса. 2022. № 2(60). С. 3-15.
7. Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
8. Рашид Тарик. Создаем нейронную сеть. «Альфа-книга», 2017. 272 с.
9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
10. Цифровая экономика: 2024: краткий статистический сборник / В.Л. Абашкин, Г.И. Абдрахманова, К.О. Вишневский, Л.М. Гохберг и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. 124 с.
11. Ultralytics YOLOv8 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/710016/#1> (дата обращения 20.06.2024).

УДК 621.396.626

Математический анализ модели векторного амплитудно-частотного алгоритма подавления мультипликативных негауссовых помех в пространственно-распределенных антенах

Яна Юрьевна Ионченкова, старший преподаватель кафедры математики,
Евгений Кимович Самаров, доктор технических наук,
заведующий кафедрой математики,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет», г. Санкт-Петербург

Рассмотрен и проанализирован векторный амплитудно-частотный алгоритм подавления мультипликативных негауссовых помех, в пространственно-распределенных антенах, в условиях априорной недостаточности. Показано, что предложенный в работе метод, можно рассматривать как весьма перспективный.

Пространственно-распределенные антенны, линейный тракт приемных антенн, узкополосный процесс, плотность распределения вероятностей, нестационарные случайные процессы, линейные преобразования входного сигнала.

Mathematical analysis of a vector amplitude-frequency algorithm for suppression of multiplicative non-Gaussian interference in spatially distributed antennas

Yana Yuryevna Ionchenkova, is a senior lecturer at the Department of Mathematics,
Evgeny Kimovich Samarov, Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of Mathematics,
St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg

A vector amplitude-frequency algorithm for suppressing multiplicative non-Gaussian interference in spatially distributed antennas under conditions of a priori insufficiency is considered and analyzed. It is shown that the method proposed in the paper can be considered as very promising.

Spatially distributed antennas, linear path of receiving antennas, narrowband process, probability distribution density, non-stationary random processes, linear transformations of the input signal.

Введение.

Обнаружение «слабых» импульсных сигналов пространственно-распределенными антеннами (ПРА), на фоне интенсивных негауссовых помех, является весьма нетривиальной задачей [1-5].

Узкополосный процесс $x(t)$ на выходе линейного тракта ПРА можно представить в виде суперпозиции двух квазигармонических колебаний [1]:

$$x_i(t) = \lambda s_i(t) + n_i(t) = R_i(t) \cos[\omega_i t + \vartheta_i(t)], i = 1, 2,$$

где $\lambda = (0, 1)$ – параметр обнаружения; $s_i(t)$ и $n_i(t)$ – «слабый» полезный сигнал и аддитивная негауссовская помеха; $R_i(t)$ и $\vartheta_i(t)$ – огибающая и фаза узкополосного процесса $x_i(t)$;

$$\left| \frac{d \ln R_i(t)}{dt} \right|, \left| \frac{d \vartheta_i(t)}{dt} \right| \ll \Omega, \Omega = \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{2} \quad (1)$$

– частота биений; ω_1 и ω_2 – собственные частоты механической системы ПРА, $\omega_2 \geq \omega_1$.

Как правило, при квазинепрерывной эксплуатации ПРА для формирования банка данных используется так называемый режим медленной фильтрации («SlowFiltering»). В этом режиме сохраняется информация о поведении случайного векторного процесса

$$\mathbf{E}(t) = [E_1(t) E_2(t)]^T,$$

где $E_{1,2}(t) = R_{1,2}^2(t)$ – квадраты огибающих узкополосных процессов $x_{1,2}(t)$; T – математический знак транспонирования.

При обнаружении «слабых» импульсов в условиях априорной неопределенности, для обработки векторного процесса $\mathbf{E}(t)$, в [6] предложен следующий алгоритм:

$$\mathbf{E}(t) \rightarrow y(t) = f[E_1(t) E_2(t)] \rightarrow \int_0^{T_h} y(t) r(t) dt, \quad (2)$$

где $f[E_1(t) E_2(t)]$ – оптимальная характеристика безынерционного нелинейного преобразователя (БНП) по критерию отношения сигнал/шум (ОСШ); $r(t)$ – весовой сигнал в «гауссовом» корреляционном приемнике [7-12]; T_h – интервал наблюдения.

Обработка информации по схеме (2) представляет собой один из возможных вариантов скалярного амплитудно-частотного алгоритма подавления коррелированных негауссовых помех [1,10]. В предлагаемой статье рассматривается векторный амплитудно-частотный алгоритм подавления мультиплектических негауссовых шумов в режиме медленной фильтрации («SlowFiltering»), который в максимальной степени учитывает особенности формирования банка данных ПРА в этом режиме.

Амплитудно-частотное подавление коррелированных негауссовых помех.

Пусть $A_{1,2}(t) = a G_{1,2}(t - \xi)$ – огибающая «слабых» узкополосных сигналов $s_{1,2}(t)$; a и ξ – амплитуда и момент прихода информационного импульса; $G_{1,2}(t)$ – огибающие импульсных характеристик отдельных частотных каналов; $W_{2E}(E_1, A_1^2; E_2, A_2^2)$ – совместная плотность распределения вероятностей (ПРВ)

случайных процессов $E_1(t)$ и $E_2(t)$ в совпадающие моменты времени; $\langle \cdot \rangle$ – математический символ записи оператора статистического усреднения, $\langle \cdot \rangle \approx M_t = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \{\cdot\} dt$, T_0 – период стационарности шумов в системе.

Тогда, согласно [6], предполагая, что

$$\langle y(t) | \lambda = 0 \rangle = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f[E_1, E_2] W_{2E}(E_1, 0; E_2, 0) dE_1 dE_2 = 0,$$

$$y(t) \approx \lambda u(t) + \vartheta(t), \quad 0 \leq t \leq T,$$

где

$$u(t) = \langle y(t) | \lambda = 1 \rangle =$$

$$= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f[E_1, E_2] \psi(E_1, E_2; t) dE_1 dE_2 = 0; \quad (3)$$

$$\psi(E_1, E_2; t) = \sum_{i=1}^2 A_i^2(t) \left[\frac{\partial W_{2E}(E_1, A_1^2; E_2, A_2^2)}{\partial A_i^2} \right]_0,$$

$[\cdot]_0 = [\cdot]_{A_1=A_2=0}$; $u(t)$ – полезный сигнал на выходе БНП; $\vartheta(t)$ – аддитивная помеха с нулевым средним значением и дисперсией

$$\sigma^2 = \langle f^2[E_1, E_2] | \lambda = 0 \rangle =$$

$$= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f^2[E_1, E_2] W_{2E}(E_1, E_2; 0, 0) dE_1 dE_2 \approx M_t \{y^2(t)\}.$$

При амплитудно-частотном подавлении коррелированных негауссовых помех характеристика $f[E_1, E_2]$ БНП выбирается таким образом, чтобы максимизировать ОСШ

$$\rho(t_0) = \frac{|s(t_0)|}{\sigma},$$

где t_0 – момент наблюдения.

На рисунке 1 [2] приведен пример амплитудно-частотной характеристики БНП $Z_h(\eta_h; \eta_{h-1})$,

$$Z_h(\eta_h; \eta_{h-1}) = \frac{[d \ln \eta_h W_{\eta}(\eta_h | \eta_{h-1})]}{d \eta_h} =$$

$$= \{2\eta_h^{-1} - a_{\eta} \eta_h + r_{\eta} a_{\eta} \eta_h I_1(a_{\eta} r_{\eta} \eta_h \eta_{h-1}) / I_0(a_{\eta} r_{\eta} \eta_h \eta_{h-1})\},$$

когда на полезный сигнал воздействует коррелированная мультиплексивная негауссовская помеха η_h с переходной ПРВ

$$W_{\eta}(\eta_h | \eta_{h-1}) = a_{\eta} \eta_h \exp\{-0.5 a_{\eta} (\eta_h^2 + r_{\eta}^2 \eta_{h-1}^2)\} I_0(a_{\eta} r_{\eta} \eta_h \eta_{h-1}),$$

где $a_{\eta} = [\sigma_{\eta}^2 (1 - r_{\eta}^2)]^{-1}$; σ_{η}^2 – дисперсия мультиплексивной помехи; r_{η} – коэффициент корреляции мультиплексивной помехи; $I_n(\cdot)$ – функция Бесселя I-го рода n -го порядка; $h = \overline{1, H}$, $H = T/T_0$ – число выборок на интервале наблюдения; T_0 – период дискретизации.

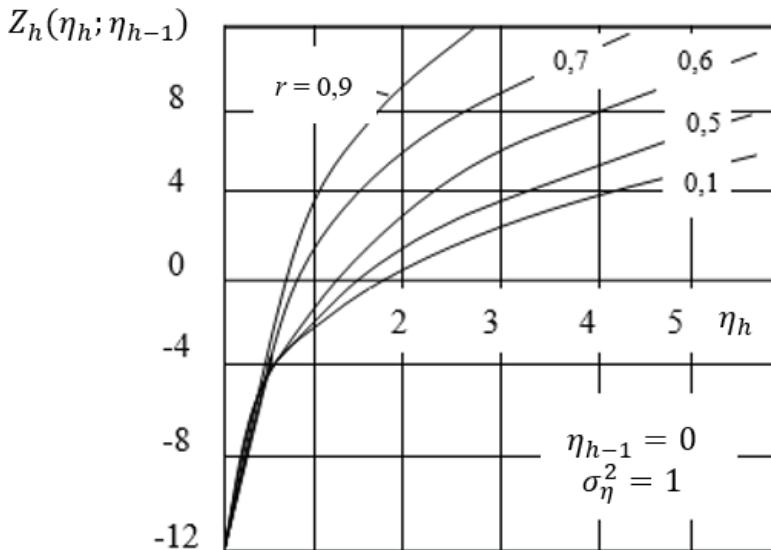


Рисунок 1 – Характеристика БНП $Z_h(\eta_h; \eta_{h-1})$

График зависимости приведенной погрешности $\delta_e^2 = \sigma_{e,\lambda}^2 / \sigma_\lambda^2$ представленный на рисунке 2, иллюстрирует влияние на эффективность работы синтезированного алгоритма коэффициентов корреляции информационного параметра r_λ и помехи r_η при различных ОСШ ρ .

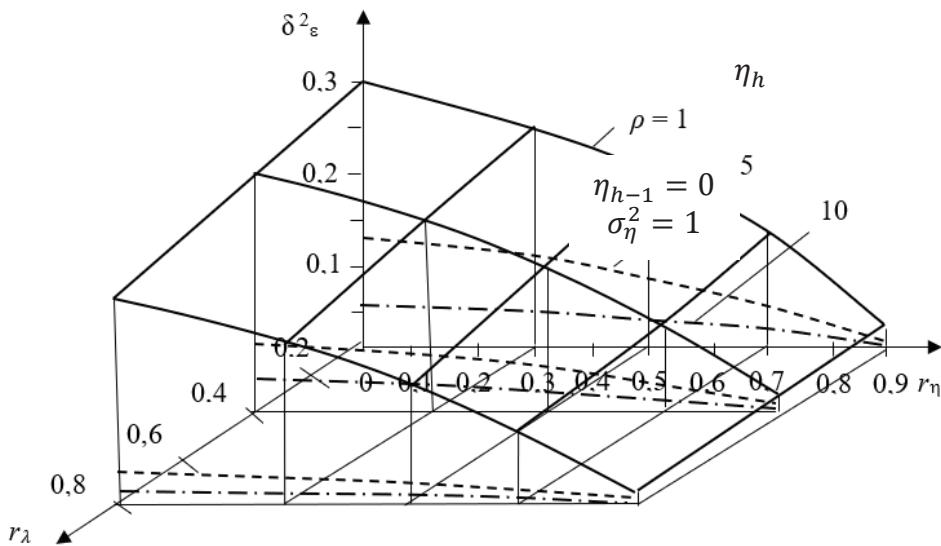


Рисунок 2 – Зависимость $\delta_e^2 = f(r_\eta, r_\lambda)$

Приведенные зависимости [2] иллюстрирует выигрыш, который может быть достигнут за счет учета корреляционных свойств мультипликативной помехи.

Из (3) применяя для оценки интеграла неравенство Коши-Буняковского, получим

$$|u(t_0)| \leq \sigma \sqrt{\langle \Gamma^2(E_1, E_2; t_0) | \lambda = 0 \rangle};$$

$$\Gamma(E_1, E_2; t_0) = \sum_{i=1}^2 A_i^2(t_0) \left[\frac{\partial \ln W_{2E}(E_1, E_2; A_1^2, A_2^2)}{\partial A_i^2} \right]_0. \quad (4)$$

Знак равенства в (4) соответствует оптимальной характеристике БНП:

$$f[E_1, E_2] = \Gamma(E_1, E_2; t_0).$$

Следовательно, при выбранном моменте наблюдения t_0 отсчет

$$y(t_0) = f[E_1(t_0), E_2(t_0)]$$

случайного процесса $y(t)$ на выходе БНП с оптимальной характеристикой, учитывая формулу (4), можно представить в виде линейной суперпозиции

$$\begin{aligned} y(t_0) &= r_{10}y_1(t_0) + r_{20}y_2(t_0); \\ y_i(t) &= f_i[E_1(t), E_2(t)], i = 1, 2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $r_{i0} = A_i^2(t_0)$, $i = 1, 2$ – весовые коэффициенты;

$$f_i[E_1, E_2] = \left[\frac{\partial \ln W_{2E}(E_1, E_2; A_1^2, A_2^2)}{\partial A_i^2} \right]_0, i = 1, 2, \quad (6)$$

Пусть $W_{1i}(E_i, A_1^2)$ и $W_2(E_i, A_i^2 | E_j, A_j^2)$ априорные (безусловные) и условные (апостериорные) ПРВ случайных процессов $E_1(t_0)$ и $E_2(t_0)$, $i, j = 1, 2$, $i \neq j$.

Тогда совместную ПРВ можно представить в виде

$$\begin{aligned} W_{2E}(E_1, A_1^2; E_2, A_2^2) &= W_{11}(E_1, A_1^2)W_2(E_2, A_2^2 | E_1, A_1^2) = \\ &= W_{11}(E_2, A_2^2)W_2(E_1, A_1^2 | E_2, A_2^2). \end{aligned} \quad (7)$$

Из (6) и (7) получим

$$f_i[E_1, E_2] = \left[\frac{\partial \ln W_2(E_i, A_i^2 | E_j, 0)}{\partial A_i^2} \right]_0, i = 1, 2.$$

Таким образом, оптимальная по критерию ОСШ характеристика БНП в i -м канале определяется апостериорной ПРВ случайного процесса $E_i(t)$ при приеме «слабых» информационных импульсов $A_i(t) \rightarrow 0$.

При построении адаптивных БНП в условиях априорной неопределенности оптимальную характеристику БНП целесообразно представить в виде [5]:

$$f_i[E_1, E_2] = \frac{1}{w_2(E_i|E_j)} \frac{d}{dE_i} \left[E_i \frac{dw_2(E_i|E_j)}{dE_i} \right], \quad (8)$$

где

$$W_2(E_i|E_j) = W_2(E_i, 0|E_j, 0) \approx \hat{W}_2(E_i|E_j);$$

$\hat{W}_2(E_i|E_j)$ – параметрическая (непараметрическая) оценка условной ПРВ случайных процессов $E_1(t)$ и $E_2(t)$, построенная по неклассифицированным реализациям.

Алгоритм подавления мультипликативных помех.

Воспользовавшись выражением (5), запишем случайный векторный процесс $\mathbf{y}(t)$, оптимальный по критерию ОСШ, в виде суммы полезного сигнала

$$\mathbf{u}(t) = [u_1(t) u_2(t)]^T$$

и аддитивной помехи

$$\boldsymbol{\vartheta}(t) = [\vartheta_1(t) \vartheta_2(t)]^T$$

с нулевым средним и корреляционной матрицей

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(\tau) &= \langle \boldsymbol{\vartheta}(t + \tau) \boldsymbol{\vartheta}^T(t) \rangle; \\ \mathbf{y}(t) &= [y_1(t) y_2(t)]^T = \lambda \mathbf{u}(t) + \boldsymbol{\vartheta}(t). \end{aligned}$$

В условиях априорной неопределенности корреляционная матрица $\mathbf{K}(\tau)$ оказывается неизвестной и заменяется непараметрической оценкой:

$$\mathbf{K}(\tau) \approx M_i \{ \boldsymbol{\vartheta}(t + \tau) \boldsymbol{\vartheta}^T(t) \};$$

при обнаружении «слабых» информационных импульсов

$$\begin{aligned} u_i(t) &= \langle y_i(t) | \lambda = 1 \rangle \approx \\ &\approx \sum_{k=1}^2 A_k^2(t) \int_0^\infty \int_0^\infty f_i[E_1, E_2] f_k[E_1, E_2] \times \\ &\quad \times W_{2E}(E_1, E_2; 0, 0) dE_1 dE_2 = \\ &= \sum_{k=1}^2 A_k^2(t) \langle \vartheta_i(t) \vartheta_k(t) \rangle \approx \\ &\approx \sum_{k=1}^2 A_k^2(t) M_t \{ \vartheta_i(t) \vartheta_k(t) \}, i = 1, 2. \end{aligned}$$

Тогда, учитывая принципы построения оптимальных систем при обнаружении векторных сигналов на фоне аддитивных гауссовских шумов [7-12], полу-

чаем

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(t) &\rightarrow y(t) \rightarrow \int_0^{T_h} \mathbf{y}^T(t) \mathbf{r}(t) dt = \\ &= \int_0^{T_h} [y_1(t)r_1(t) + y_2(t)r_2(t)] dt, \end{aligned} \quad (9)$$

Весовой вектор $\mathbf{r}(t) = [r_1(t)r_2(t)]^T$ в выражении (9) определяется матричным линейным интегральным уравнением

$$\int_0^{T_h} \mathbf{K}(t - \tau) \mathbf{r}(\tau) d\tau, \quad 0 \leq t \leq T_h. \quad (10)$$

Условие (1) позволяет пренебречь взаимной корреляцией аддитивных узкополосных помех на выходе линейного тракта ПРА, $\langle n_1(t)n_2(t + \tau) \rangle \approx 0$.

В гауссовском приближении это приводит к статистической независимости случайных процессов $E_1(t)$ и $E_2(t)$ при нулевой гипотезе $\lambda = 0$. При негауссовых шумах в системе эти случайные процессы могут быть статистически зависимыми:

$$W_{2E}(E_1, 0; E_2, 0) \neq W_{11}(E_1, 0)W_{12}(E_2, 0).$$

Статистическая зависимость квадратов огибающих негауссовых узкополосных помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$ при обработке информации по схеме (9) учитывается тем, что оптимальные по критерию ОСШ характеристики БНП $f_i[E_1, E_2]$ определяются апостериорными (условными) ПРВ

$$W_2(E_1|E_2) = \frac{W_{2E}(E_i, 0; E_j, 0)}{W_{1j}(E_j, 0)}$$

случайных процессов $E_1(t)$ и $E_2(t)$ при нулевой гипотезе $\lambda = 0$. Совместная ПРВ $W_{2E}(E_i, 0; E_j, 0)$ на практике неизвестна. а ее измерение (оценение) представляет достаточно сложную задачу [5].

Схему обработки (9) можно существенно упростить, если при вычислении характеристик БНП неизвестные апостериорные ПРВ заменить параметрическими (непараметрическими) оценками априорных (безусловных) ПРВ случайных процессов $E_1(t)$ и $E_2(t)$:

$$W_2(E_i, 0; E_j, 0) \rightarrow W_{1i}(E_i, 0), \quad i = 1, 2.$$

Тогда (см. (8))

$$\begin{aligned} y_i(t) &= f_i[E_i(t)], \\ f_i[E] &= \left[\frac{\partial \ln W_{1i}(E, A_i^2)}{\partial A_i^2} \right]_0 = \frac{1}{W_{1i}(E, 0)} \frac{d}{dE} \left[E \frac{dW_{1i}(E, 0)}{dE} \right]. \end{aligned}$$

Статистическая зависимость случайных процессов $E_1(t)$ и $E_2(t)$ при таком «раздельном» формировании случайных процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ косвенно учитывается на этапе комплексной обработке случайного векторного процесса.

Аддитивные помехи.

Аддитивные помехи $n_1(t)$ и $n_2(t)$ на выходе ПРА можно рассматривать как некоррелированные аномально-засоренные случайные узкополосные процессы с бигаусовыми ПРВ [6].

Среднее значения этих случайных процессов равны нулю, а дисперсии определяются формулой

$$\sigma_i^2 = (1 - p)\sigma_{i1}^2 + p\sigma_{i2}^2, \quad i = 1, 2,$$

где $0 \leq p \leq 1$ – вероятность появления аномалии в произвольный момент времени; σ_{i1}^2 и σ_{i2}^2 – характерные параметры.

При аномально-засоренных шумах простейшую параметрическую оценку неизвестной совместной ПРВ можно представить в виде [6]:

$$W_{2E}(E_1, 0; E_2, 0) = \sum_{k=1}^2 p_k \frac{1}{4\sigma_{1k}^2 \sigma_{2k}^2} \times \exp \left\{ - \left[\frac{E_1}{\sigma_{1k}^2} + \frac{E_2}{\sigma_{2k}^2} \right] \right\} = \Sigma_2(E_1, E_2), \quad (11)$$

где $p_1 = (1 - p)$, $p_2 = p$.

Интегрируя это выражение по «лишним» индексам, находим

$$W_{1i}(E_i) = \sum_{k=1}^2 p_k \frac{1}{2\sigma_{ik}^2} \exp \left\{ - \frac{E_i}{\sigma_{ik}^2} \right\} = \Sigma_i, \quad i = 1, 2. \quad (12)$$

Следовательно, апостериорные ПРВ случайных процессов $E_1(t)$ и $E_2(t)$ при нулевой гипотезе $\lambda = 0$ будут иметь вид

$$W_2(E_1|E_2) = \frac{\Sigma_2(E_1, E_2)}{\Sigma_2(E_2)}, \quad W_2(E_2|E_1) = \frac{\Sigma_2(E_1, E_2)}{\Sigma_1(E_1)}. \quad (13)$$

Учитывая выражения (11) и (13), можно определить оптимальные характеристики $f_i[E_1, E_2]$ БНП в схеме (9) при наличии на выходе линейного тракта ПРА аномально-засоренных шумов.

Неизвестные параметры p , $(\sigma_{11}^2, \sigma_{12}^2)$ и $(\sigma_{21}^2, \sigma_{22}^2)$ биэкспоненциальной ПРВ (11) определяются по неклассифицированным реализациям случайных процессов $E_1(t)$ и $E_2(t)$.

При упрощенной схеме обработки, для которой (см. выше) $f_i[E_1, E_2] = f_i[E_i]$, в случае аппроксимации неизвестных априорных (безусловных) ПРВ случайных процессов можно использовать формулу (12) при $p_k = p_{ik}$, где $\sum_{k=1}^2 p_{ik} = 1$ ($p_{1k} \neq p_{2k}$).

Воспользовавшись результатами [2], проиллюстрируем стационарную

относительную дисперсию оценки информационной последовательности $\{\lambda_h\}$, для случая, когда последовательность $\{\lambda_h\}$ является гауссовской, марковской с ПРВ перехода

$$W_\lambda(\lambda_h | \lambda_{h-1}) = \frac{1}{[2\pi\sigma_\lambda^2(1-r_\lambda^2)]^{0.5}} \exp\left\{\frac{-(\lambda_h - r_\lambda\lambda_{h-1})^2}{2\sigma_\lambda^2(1-r_\lambda^2)}\right\},$$

а ПРВ аддитивной помехи описывается одномерной бимодальной ПРВ

$$W_n(n_h) = A \exp\{pn_h^2 - gn_h^4\},$$

где A – коэффициент нормировки; pn – параметры распределения.

Опустив промежуточные выкладки и необходимые математические преобразования, получим:

$$\delta_{\varepsilon,6}^2 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_\lambda^2} = \frac{(1-r_\lambda^2)(1+\mu_{\text{oa}}^2\rho_\Gamma^2(1+\xi^2))}{2r_\lambda^2\mu_{\text{oa}}^2\rho_\Gamma^2(1+\xi^2)} \left[\left(1 + \frac{4r_\lambda^2\mu_{\text{oa}}^2\rho_\Gamma^2(1+\xi^2)}{(1-r_\lambda^2)(1+\mu_{\text{oa}}^2\rho_\Gamma^2(1+\xi^2))^2} \right)^{0.5} - 1 \right],$$

где $\mu_{\text{oa}}^2 = I_\Phi^n \sigma_n^2$ – коэффициент амплитудного подавления негауссовской помехи; I_Φ^n – количество информации по Фишеру относительно ПРВ помехи; σ_n^2 – дисперсия помехи; ρ_Γ^2 – характеризует обобщенное отношение сигнал-помеха в случае гауссовской помехи; $\xi^2 = \sigma_\eta^2/m_\eta^2$ – квадрат коэффициента вариации случайного процесса $\{\eta_h\}$ характеризующего мультипликативную помеху [2], σ_η^2 , m_η^2 – соответственно, дисперсия и математическое ожидание случайного процесса $\{\eta_h\}$.

Заметим, что в случае быстрых изменений η_h спектр мультипликативной помехи $F_{\text{мп}}$ считается гораздо шире спектра информационного процесса (сообщения) F_c , так что $F_{\text{мп}} \gg F_c$.

Зависимости $\delta_{\varepsilon,6}^2 = f(\rho_h, r_\lambda)$, где $\rho_h = \mu_{\text{oa}}^2\rho_\Gamma^2$, для различных ξ^2 при любой ПРВ приведены на рисунке 3.

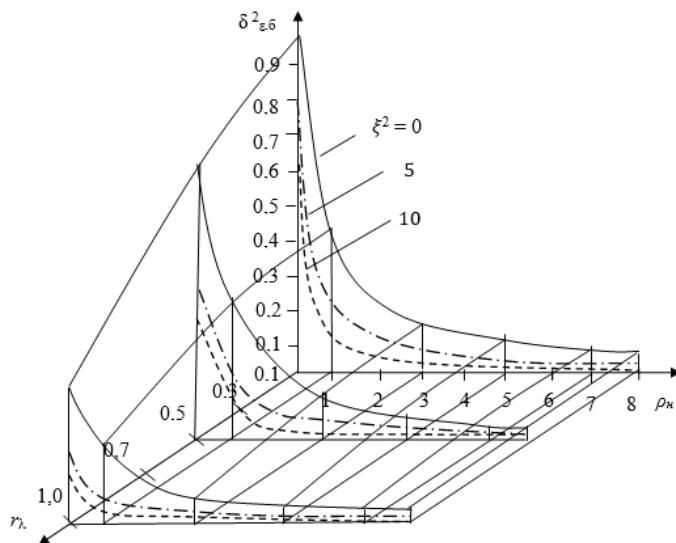


Рисунок 3 – Зависимость $\delta_{\varepsilon,6}^2 = f(\rho_n; r_\lambda)$ при $\xi^2 = \text{const}$

Нетрудно видеть, что при точно известной мультипликативной составляющей помехи эффективность обработки возрастает с ростом ξ^2 . Если принять, что $\xi^2 = 0$, то получаем формулу для относительной дисперсии оценки информационной последовательности при воздействии только аддитивной негауссовой помехи.

Расчет весового вектора $r(t)$.

Записанное в матричной форме интегральное уравнение (10) эквивалентно следующей системе линейных интегральных уравнений типа Фредгольма [9]:

$$\sum_{m=1}^2 \int_0^{T_h} K_{im}(t - \tau) r_m(\tau) d\tau = u_i(t), \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

где $K_{im}(t - \tau) = \langle \vartheta_i(t) \vartheta_m(\tau) \rangle \approx M_t \{ \vartheta_i(t) \vartheta_m(\tau) \}$ – взаимная функция корреляции аддитивных помех на выходе отдельных БНП.

При решении системы уравнений (14) будем считать, что длительность интервала наблюдения T_h значительно превышает времена корреляции аддитивных помех и эффективные длительности полезных сигналов $u_{1,2}(t)$.

В этом случае эту систему можно рассматривать как систему линейных интегральных уравнений типа свертки. В частотной области система таких уравнений переходит в систему алгебраических уравнений, решение которой определяется следующими формулами:

$$\begin{aligned} r_1(t) \leftrightarrow r_{1\omega}(j\omega) &\approx \frac{N_{22}(j\omega)u_{1\omega}(j\omega) - N_{12}(j\omega)u_{2\omega}(j\omega)}{D(\omega)}; \\ r_2(t) \leftrightarrow r_{2\omega}(j\omega) &\approx \frac{N_{11}(j\omega)u_{1\omega}(j\omega) - N_{12}^*(j\omega)u_{2\omega}(j\omega)}{D(\omega)}; \\ D(\omega) &= N_{11}(j\omega)N_{22}(j\omega) - |N_{12}(j\omega)|^2; \end{aligned} \quad (15)$$

$$N_{im}(j\omega) \leftrightarrow K_{im}(\tau) = \langle \vartheta_i(t) \vartheta_m(t - \tau) \rangle$$

– взаимный энергетический спектр аддитивных помех $\vartheta_1(t)$ и $\vartheta_2(t)$;
 $u_{1\omega}(j\omega) \leftrightarrow u_2(t)$ – спектры полезных сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$; $\langle \cdot \rangle$ – математический знак эквивалентности.

Для произвольных коррелированных негауссовых шумов корреляционная обработка по схеме (9) с весовым вектором, определяемым системой уравнений (14), оказывается оптимальной по критерию ОСШ в классе возможных линейных преобразований.

Вычисление опорных функций $r_2(t)r_1(t)$ по формулам (15) значительно упрощается при характерном для приемных антенн условии:

$$A_1(t) = A_2(t) = A(t) = A(0)\exp\{-\Delta\Omega|t|\},$$

где $\Delta\Omega$ – полоса пропускания отдельного канала.

Следовательно, в этом случае можно записать

$$u_i(t) \approx \eta_i A^2(t); \eta_i = [\sigma_i^2 + \rho(0)\sigma_1\sigma_2], i = 1, 2,$$

где $\rho(0)$ – коэффициент взаимной корреляции аддитивных помех $\vartheta_1(t)$ и $\vartheta_2(t)$ в совпадающие моменты времени.

Заметим, что на практике коэффициенты корреляции $\rho(0)$ и взаимные энергетические спектры $N_{im}(j\omega)$ заменяются соответствующими выборочными непараметрическими оценками, построенными по неклассифицированным реализациям случайных процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ на выходах БНП.

Заключение.

Традиционный метод защиты ПРА от негауссовых помех основан на совместной обработке информации, полученной с помощью двух пространственно-разнесенных приемников. Однако, из-за высокой вероятности пропуска полезного сигнала, при обнаружении «слабых» информационных импульсов, применение такой «схемы совпадений» становится неэффективным. Таким образом, векторный амплитудно-частотный алгоритм подавления мультиплексивных негауссовых помех в условиях априорной недостаточности, предложенный в работе, можно рассматривать как весьма перспективный. Особенно это относится к раздельному формированию случайных процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$.

Заметим, что на практике, как правило, доступны преимущественно непараметрические оценки одномерных ПРВ и энергетических спектров стационарных и стационарно связанных случайных процессов [1].

Для антennы с симметричной относительно частоты $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$ амплитудно-частотной характеристикой линейного тракта ($G_1(t) = G_2(t) = G(t)$) скалярный алгоритм обработки (2) оказывается частным случаем векторного алгоритма (9) при специальном выборе весового вектора $r_1(t) = r_2(t) = r(t)$. Взаимная корреляция аддитивных помех $\vartheta_1(t)$ и $\vartheta_2(t)$ в схеме (2) учитывается по отношению к векторному алгоритму в минимальной степени.

Литература

1. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов / Под ред. А.П. Бакута. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.
2. Артюшенко В.М. Обработка информационных параметров сигнала в условиях аддитивно-мультипликативных негауссовых помех: монография. Королев МО: ФГБОУ ВПО ФТА. Изд-во «Канцлер», 2014. 298 с.
3. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Использование эллиптически симметричной модели плотности распределения вероятности для описания негауссовых помех // Радиотехника. 2016. № 6. С. 113-117.
4. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка погрешности измерения векторного информационного параметра сигнала на фоне мультипликативных помех // Радиотехника. 2016. № 2. С. 72-82.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных / Пер. с англ. В.Е. Привальского, А.И. Кочубинского; под ред И.Н. Коваленко. М.: Мир, 1989. 540 с.
6. Валеев В.Т., Сосулин Ю.Г. Обнаружение слабых когерентных сигналов в коррелированных негауссовых помехах // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14. №2. С. 230-238.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. Радио, 1974. Т. 1. 552 с.
8. Левин Б.Р., Кушнир А.Ф. Асимптотически-оптимальные алгоритмы обнаружения и различения сигналов на фоне помех // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14. №2. С.249-258.
9. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. М.: Радио и связь, 1992. 303 с.
10. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
11. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный приём сигналов. М.: Сов. Радио, 1975. 704 с.
12. Artyushenko V.M., Volovach V.I., Vasilevich I.V. Estimation of the effect of multiplicative noise on signal detection against the background of additive noise. В сборнике: Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020. Proceedings. 2020. С. 9067420.

УДК 621.317.361

Моделирование сравнительной оценки помехоустойчивости метода измерения частоты сигнала по его коротким реализациям

Евгений Кимович Самаров, доктор технических наук,

заведующий кафедрой математики,

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет», г. Санкт-Петербург

В настоящее время предложены и проанализированы различные методы и алгоритмы измерения частоты сигнала по коротким реализациям, проведено их сравнение как по числу необходимых вычислительных операций, так и по устойчивости к воздействию шумовой помехи. Как правило, значение частоты оценивалось во временной области итеративными методами при предварительном представлении сигнала в виде суммы его квадратур. Однако на практике наиболее приемлемые для оценки частоты гармонических колебаний алгоритмы реализуются в спектральной области, на основе дискретного или быстрого преобразования Фурье. В статье был проведен анализ эффективности оценки частоты гармонического сигнала по его короткой реализации, используя спектр исходного сигнала в базисе Фурье. Путем моделирования на ЭВМ осуществлена сравнительная оценка помехоустойчивости метода измерения частоты полезного сигнала по его коротким реализациям. Показано, что применение данного метода, с меньшим числом отсчетов сигнала, позволяет обеспечить практически одинаковую точность измерения, в сравнении с известными методами.

Дискретное преобразование Фурье, точность оценки частоты, спектральное преобразование, количество вычислительных операций, аномальные погрешности измерений.

Modeling a comparative evaluation of the noise immunity of a signal frequency measurement method based on its short implementations

Evgeny Kimovich Samarov, Doctor of Technical Sciences,

Head of the Department of Mathematics,

St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg

Currently, various methods and algorithms for measuring the frequency of a signal for short implementations have been proposed and analyzed, and they have been compared both in terms of the number of computational operations required and in terms of resistance to noise interference. As a rule, the frequency value was estimated in the time domain by iterative methods when the signal was preliminarily represented as the sum of its quadratures. However, in practice, the most suitable algorithms for estimating the frequency of harmonic oscillations are implemented in the spectral domain, based on the discrete or fast Fourier transform. The article analyzes the effectiveness of estimating the frequency of a harmonic signal based on its short implementation using the spectrum of the original signal in the Fourier basis. By computer simu-

lation, a comparative evaluation of the noise immunity of a method for measuring the frequency of a useful signal based on its short implementations was carried out. It is shown that the application of this method makes it possible to ensure the same measurement accuracy, compared with known methods, with a smaller number of signal samples, which leads to a reduction in computational costs.

Discrete Fourier transform, frequency estimation accuracy, spectral transformation, number of computational operations, abnormal measurement errors.

Введение.

В ряде случаев измерение частоты гармонических колебаний приходится производить по короткой реализации сигнала, имеющей длительность в доли и единицы периода. Такая задача возникает, например, при измерении малых расстояний с помощью дальномеров с частотно-модулированным зондирующим сигналом, когда решение, приходится принимать по одному-трем периодам гармонического сигнала [1, 2]. В литературных источниках предложены и проанализированы различные методы и алгоритмы измерения частоты такого сигнала по коротким реализациям, проведено их сравнение как по числу необходимых вычислительных операций, так и по устойчивости к воздействию шумовой помехи [2, 7]. Как правило, значение частоты оценивалось во временной области итеративными методами при предварительном представлении сигнала в виде суммы его квадратур. Однако часто наиболее приемлемые для оценки частоты гармонических колебаний алгоритмы реализуются в спектральной области [5], на основе дискретного или быстрого преобразования Фурье (ДПФ или БПФ). Проведем анализ эффективности оценки частоты гармонического сигнала по его короткой реализации, используя спектр исходного сигнала в базисе Фурье.

Пусть, с выхода измерителя частоты (с его аналого-цифрового преобразователя) поступает аддитивная смесь $S(h)$ полезной $U(h)$ и шумовой составляющей $n(h)$, и заданная последовательность отсчетов

$$S(h) = U(h) + n(h) = CU_0 \cos(2\pi hf + \varphi) + n(h), \quad (1)$$

где $U_0 = 1$; φ , f – амплитуда, начальная фаза и частота сигнала $U(h)$; $n(h)$ – реализация белого нормального шума; $h = 0, H - 1$; H – число отсчетов сигнала в интервале наблюдения T_c ; $C > 0$ – параметр масштаба, различный для каждой реализации сигнала и не зависящий от времени ни интервале наблюдения T_c .

Заметим, что на интервал наблюдения T_c не накладывается никаких ограничений.

В общем случае наряду с частотой f неизвестны значения C и φ . Когда оценивается только частота, то значения C и φ являются мешающими параметрами. В результате БПФ последовательности (1) формируется комплексный спектр

$$S(im) = \frac{1}{\sqrt{H}} \sum_{h=0}^{H-1} S(h) \exp\{-i2\pi hm/H\}, m = 0, 1, \dots, \frac{H}{2} - 1. \quad (2)$$

Используя БПФ, по реализациям эталонного сигнала

$$U_k(h) = U_0 \cos(2\pi h f_k + \varphi_0), k = \overline{1, K}, \quad (3)$$

осуществляется оценка f частоты $S(h)$ путем сравнения формы его спектра $S(im)$ с формой эталонных спектров $U(im)$,

где φ_0 – начальная фаза; K – число (определяет требуемую точность измерений) эталонных спектров; $f_{\min} \leq f_k \leq f_{\max}$, f_{\min} и f_{\max} – возможные минимальное и максимальное значения частоты f .

Вычисляя расстояние $R(S, U_k)$ между спектрами $S(im)$ и $U_k(im)$, $k = \overline{1, K}$, будем принимать решение о значении частоты f сигнала $S(h)$:

$$R(y, y_k) = (\sum_{m=M1}^{M2} |y(im) - y_k(im)|^2)^{1/2}, k = 1, 2, \dots, K, \quad (4)$$

где $M1$ и $M2$ определяют границы частотного интервала, внутри которого находятся n спектральных составляющих, используемых при вычислении расстояния.

За частоту f принимаем ту частоту f_k , при которой расстояние $R(S, U_k)$ между спектром $S(im)$ и спектром эталона, вычисленным по сигналу (3), будет минимальным.

Очевидно, что в общем случае необходимо выбирать спектральные составляющие с максимальным отношением сигнал/шум (ОСШ). Анализ эффективности использования алгоритма (4) для оценки частоты проводился с помощью моделирования.

На рисунке 1 приведена зависимость погрешности ε оценки \hat{f} частоты f , определенной как $\varepsilon = \hat{f} - f$, полученная в бес помеховой обстановке.

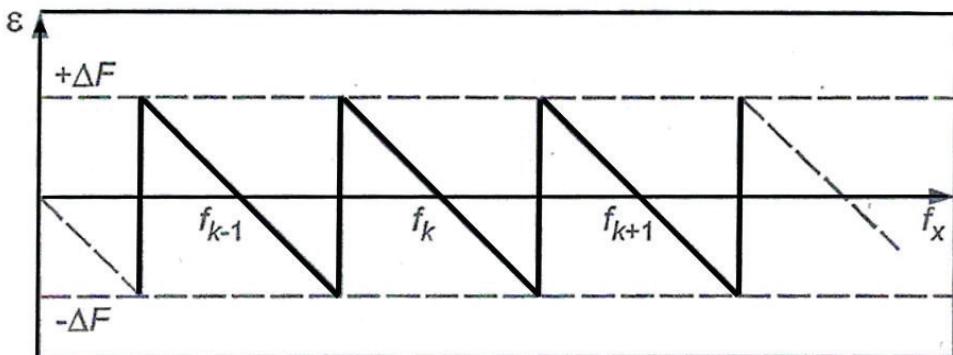


Рисунок 1 – Зависимость систематической погрешности ε от измеряемой частоты

Из рисунка 1 видно, что при изменении частоты f оценка \hat{f} меняется скачкообразно.

Когда частоты сигнала

$$f = \Delta F(l = 1/2), l = 0, 1, \dots,$$

где $\Delta F = f_k - f_{k-1}$ – разница между частотами эталонных сигналов с соседними номерами, значение оценки изменяется на $2\Delta F$.

Уменьшая ΔF , то есть увеличивая количество эталонных спектров, можно увеличить точность измерения частоты.

Зависимость относительной погрешности δf измерения частоты f от отношения времени наблюдения T_c к длительности периода T при различных ОСШ приведены на рисунках 2 и 3.

Относительная погрешность определялась исходя из выражения

$$\delta f = \frac{|\Delta f| + \sigma_f}{f},$$

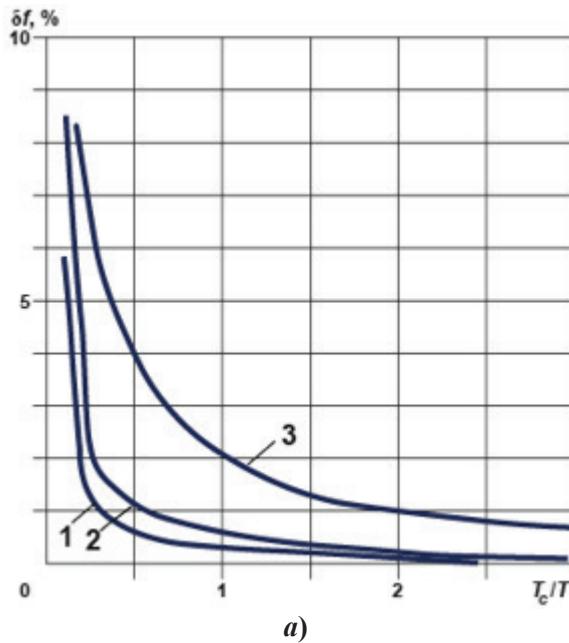
где

$$\Delta f = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{f}_l - f = \hat{m}_f - f,$$

а среднеквадратическое отклонение (СКО) значения σ_f представлено в виде

$$\sigma_f = \left(\frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L (\hat{f}_l - \hat{m}_f)^2 \right)^{1/2}.$$

На рисунке 2а показана зависимость $\delta f = f(T_c/T)$ при СКО шума $\sigma_{\text{ш}} = 0,05; 0,1; 0,3$ (соответственно, кривые 1, 2, 3).



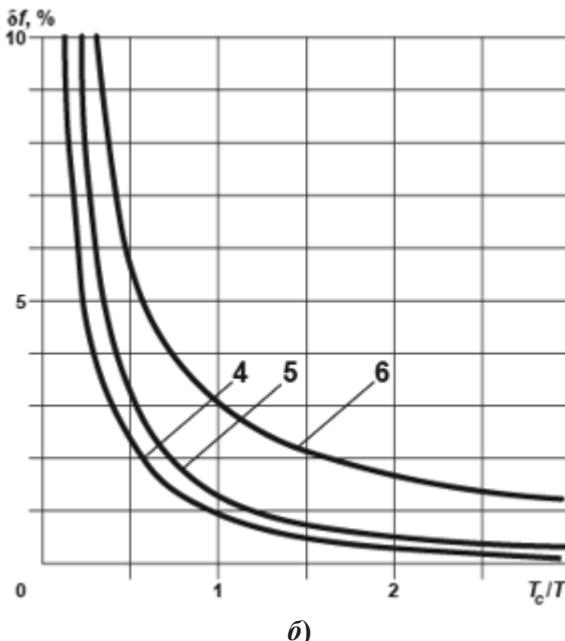


Рисунок 2 – Зависимость $\delta f = f(T_c/T)$: a – без использования инвариантного преобразования; b – с использованием инвариантного преобразования

Данные рисунка 2 a показывают предельную точность измерения частоты при использовании метрики (4), в которую подставлялись спектры $S(im)$ сигнала $U_k(im)$ эталона. Полагалось, что амплитуда и начальная фаза сигнала известны $\varphi = \varphi_0$, $C = 1$.

На рисунке 2 b (кривые 4, 5, 6) изображены $\delta f = f(T_c/T)$ ($\sigma_{\text{ш}} = 0,05; 0,1; 0,3$) при равномерном законе распределения параметра масштаба в интервале $(0,5; 1,5)$ с использованием инвариантного преобразования

$$y(im) = \frac{S(im)}{\sqrt{\sum_{m=0}^{\frac{H}{2}-1} |S(im)|^2}}. \quad (5)$$

Моделирование показало, что при использовании (5) результаты δf фактически совпадают с кривыми 1, 2, 3, показывающими предельную точность измерения f .

На рисунке 3 a приведены $\delta f = f(T_c/T)$ ($\sigma_{\text{ш}} = 0,05; 0,1; 0,3$) при неизвестном параметре масштаба и априорно неизвестной фазе принимаемого сигнала (кривые 1, 2, 3).

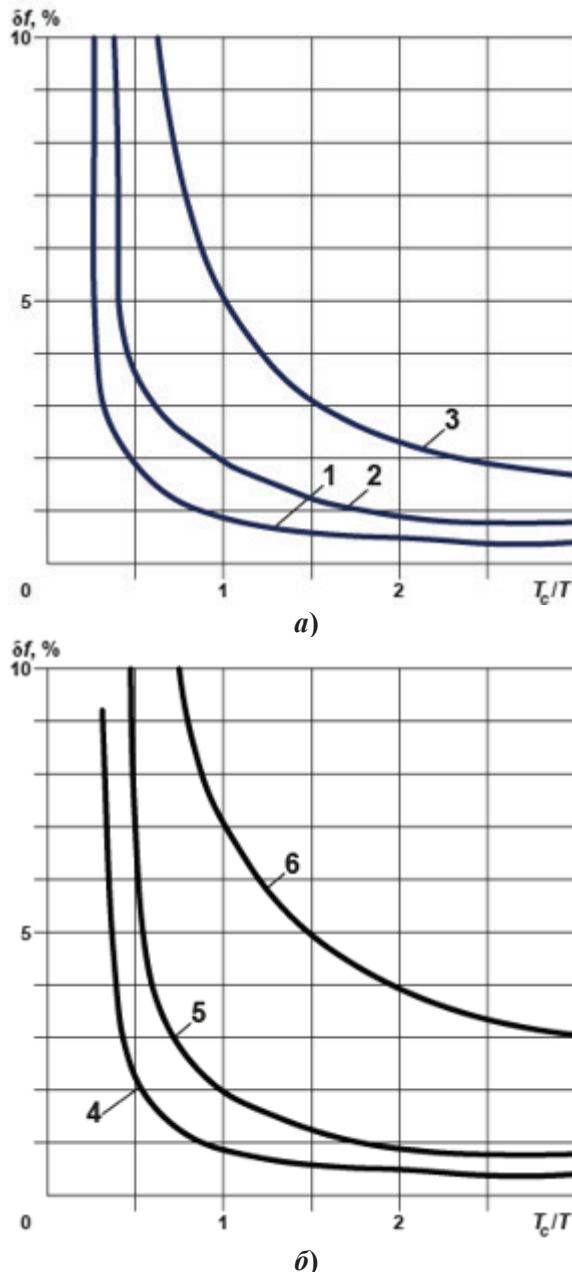


Рисунок 3 – Зависимость $\delta f = f(T_c/T)$ при априорно неизвестных значениях амплитуды и фазы сигнала: *а* – без использования спектральных преобразований; *б* – с использованием спектральных преобразований

При моделировании считалось, что фаза сигнала равномерно распределена в интервале $(-90^\circ, 90^\circ)$, а параметр C в интервале $(0,5; 1,5)$.

Из рисунка 3а видно, что к росту погрешности δf приводит отсутствие априорных данных о фазе сигнала.

После вычисления спектра с помощью преобразования

$$S(im) = \frac{1}{H} \sum_{-H/2}^{H/2} S(h) \exp\{(-i2\pi im)/H\}, i = 0, 1, \dots, \frac{H}{2} - 1.$$

можно найти мощность $\text{Re}S(h)$ или $\text{Im}S(h)$ частей спектра.

На рисунке 3б пунктирыми линиями (кривые 4, 5, 6) показаны зависимости погрешности определения частоты от СКО шума; погрешность составляла 0,05; 0,1; 0,3.

Использование спектрального преобразования (6) позволяет существенно уменьшить количество вычислительных операций, необходимых для измерения частоты.

Заключение. Сравнение полученных результатов с данными, приведенными в открытых источниках, показывает, что при использовании данного метода, с меньшим числом отсчетов H сигнала можно обеспечить примерно одинаковую точность оценки частоты. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению вычислительных затрат.

Литература

1. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка погрешности измерения векторного информационного параметра сигнала на фоне мультипликативных помех // Радиотехника. 2016. № 2. С. 72-82.
2. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Использование эллиптически симметричной модели плотности распределения вероятности для описания негауссовых помех // Радиотехника. 2016. № 6. С. 113-117.
3. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1976.
4. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1976.
5. Крот А.М., Минервина Е.Б. Быстрые алгоритмы и программы цифровой спектральной обработки сигналов и изображений. Минск: Наука и техника, 1995.
6. Селекция распознавания на основе локационной информации / Под ред. А.Л. Горелика М.: Радио и связь, 1990.
7. Artyushenko V.M., Volovach V.I., Vasilevich I.V. Estimation of the effect of multiplicative noise on signal detection against the background of additive noise. Всборнике: Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020. Proceedings. 2020. С. 9067420.

УДК 004.04

Гидрогазодинамическое моделирование центра обработки данных

Андрей Борисович Семенов, доктор технических наук, профессор,

Национальный исследовательский университет

Московский государственный строительный университет

(НИУ МГСУ), г. Москва,

Татьяна Сергеевна Аббасова, кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,

Ольга Александровна Войеко, кандидат технических наук,

заведующая кафедрой управления качеством и стандартизации,

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова» –

филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования

«Московский государственный университет геодезии и картографии»,
г. Королев, Московская область

Проанализированы проблемы CFD-моделирования машинного зала современного центра обработки данных с высокоплотными решениями. Поставлена задача обеспечения оптимального температурного режима для высоко плотных решений. Составлена геометрическая модель машинного зала центра обработки данных. Проведено моделирование систем кондиционирования машинного зала в соответствии с его геометрической моделью.

Кабельная система, геометрическая модель, вычислительная гидрогазодинамика, машинный зал, высокоплотные решения, центральный кросс, виртуальные испытания.

Hydrodynamic modeling of a data center

Andrey Borisovich Semenov, Doctor of Technical Sciences, professor,

National Research University Moscow State University of Civil Engineering

(NRU MGSU), Moscow,

Tatyana Sergeevna Abbasova, Candidate of technical Sciences,
Associate Professor Department of Information technologies and control systems,

Olga Aleksandrovna Voeiko, Candidate of Technical Sciences,

Head of the Department of Quality Management and Standardization,

«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov» –

Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Moscow State University of Geodesy and Cartography»,

Korolev, Moscow region

The problems of CFD modeling of the machine room of a modern data processing center with high-density solutions are analyzed. The task of ensuring the opti-

mal temperature regime for high-density solutions is set. A geometric model of the machine room of the data processing center is compiled. Modeling of the air conditioning systems of the machine room is carried out in accordance with its geometric model.

Cable system, geometric model, computational fluid dynamics, machine room, high-density solutions, central cross, virtual testing.

Введение

CFD-моделирование (от англ. Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидродинамика) – вид математического моделирования, относящегося к вычислительной гидрогазодинамики, подразделу механики сплошных сред, который включает физические, математические и численные методы, предназначенные для вычисления характеристик потоковых процессов. Результаты CFD-моделирования – это распределение характеристик микроклимата машинного зала (распределение температуры, давления, влажности, скорости и направление движения воздушных масс, и т.д.), которые регулируются системой кондиционирования (охлаждения). Центр обработки данных (ЦОД) является объектом эксплуатации со сложной геометрией, это обстоятельство необходимо учитывать при использовании технологии численного моделирования термодинамических процессов CFD. Актуальна разработка подробной геометрической модели ЦОД перед CFD-моделированием.

Изложение проблемы

Проблемы CFD-моделирования ЦОД появляются, если надо обеспечить оптимальный температурный режим для высокоплотных решений, когда на одну стойку ЦОДа приходится до 35 кВт потребляемой мощности [8, С.15]. В таких случаях при размещении в машинных залах стоек с ИТ-оборудованием, межрядных кондиционеров и изоляции коридоров необходимо учитывать ротацию кондиционеров и исключить возможность их перегрева [12, С.23]. Все эти обстоятельства должна учитывать геометрическая модель ЦОД, которая отражает его топологию и архитектуру.

Результаты исследования

CFD-модель – продолжение модели BIM (от англ. Building Information Model – информационная модель здания), учитывающей архитектуру здания/контейнера, в котором расположен ЦОД. На основе CFD-моделей ЦОД строится виртуальная испытательная лаборатория в специализированных программных средах, позволяющая рассчитать теплофизические процессы, обеспечить оптимальный температурный режим в ЦОД, разделить «горячие» и «холодные» коридоры.

Информационная кабельная система ЦОД строится в соответствии с топологией структурированной кабельной системы (СКС) [11, С.12]. В наиболее крупных ЦОД предполагается ее выполнение в виде трехуровневой структуры. Соответственно, меняется только терминология для обозначения отдельных укрупненных элементов кабельной системы.

Стандарты разрешают применять при построении СКС ту же элементную базу, что и в офисных СКС, но из-за высоких скоростей передачи информации гораздо большее значение имеет волоконно-оптическая техника [2, С.87].

При подготовке для CFD-моделирования данных о параметрах ЦОД, необходимо отобразить геометрию кабельной системы, схема которой показана на рисунке 1, количество обслуживаемых стоек, принципы построения машинного зала ЦОД и центрального кросса СКС, который по своей структуре является инвариантным по отношению к типу волокна, применяемого для реализации СКС. Также необходимо учесть, что распределение потоков воздуха и температуры на входах в стойки контролируется сложными процессами конвекции и зависит от параметров и расположения кроссов и стоек.

Расположение кроссов СКС показано на рисунке 2.

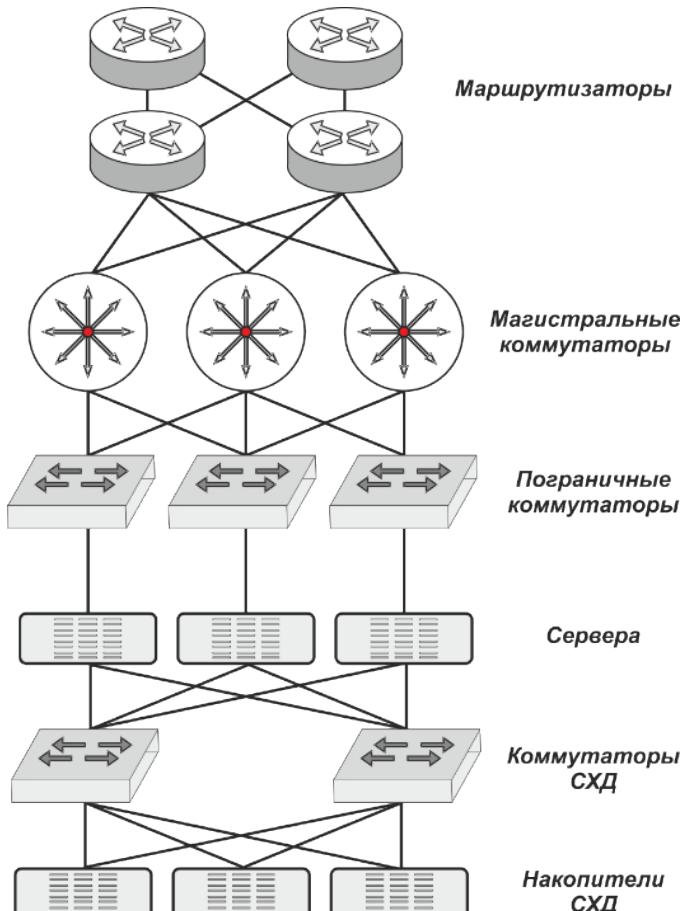


Рисунок 1 – Типовая топология структурированной кабельной системы

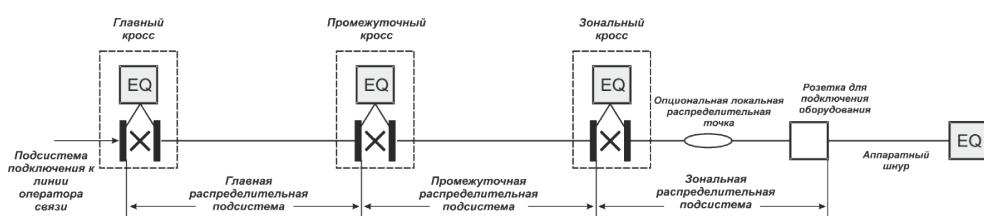


Рисунок 2 – Подключение кроссов в структурированной кабельной системе

Информационная система машинного зала ЦОД строится по правилам, отличных от, например, офисных: сервер как ключевой «активный» компонент располагается не на самом нижнем уровне, а выше, как показано на рисунке 1, так как взаимодействует не только с локальными вычислительными сетями (ЛВС), но и с накопителями массовой памяти. Данная структурная особенность не влияет на построение СКС и геометрическую модель ЦОД, а только увеличивает количество линий, организуемых в машинном зале.

Волоконно-оптическая подсистема любой СКС представляет собой совокупность отдельных стационарных линий, которые в процессе построения трактов передачи подключаются к активному сетевому оборудованию (аппарату) и соединяются между собой (в случае построения составных трактов) коммутационными шнурами [9, С.119]. Соответственно, в составе оптической подсистемы можно выделить линейную часть, которая показана на рисунке 3.

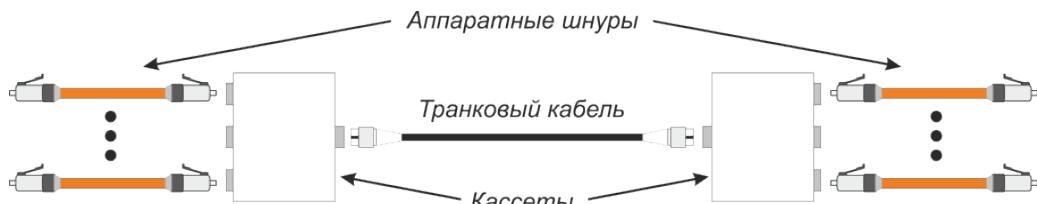


Рисунок 3 – Схема построения линейной части оптической подсистемы

В ЦОД линейная часть представлена преимущественно транковыми кабелями/сборками как одним из вариантов претерминированной сборки, например, артикул NTSS-FOAMG-PM-08-9-MTP(m)-MTP(m)-A-IN-3) и коммутационное оборудование в виде панелей, выполненных как кассетные/слотовые полки, которое обеспечивает:

- подключение аппаратных шнуров к транковому кабелю;
- переход с транкового кабеля на отдельные розеточные модули пользовательских портов.

В последнем случае кассета берет на себя дополнительную функцию адаптера корпусного типа, который из соображений удобства эксплуатации выполнен по скрытой схеме (как кассета, устанавливаемая в слотовую полку). Несмотря на высокую степень сходства с офисным прототипом, СКС для ЦОД имеют существенные отличия от офисного прототипа. Главное из них состоит в том, что СКС реализуется по модифицированной иерархической схеме, что хорошо видно из рисунка 4.

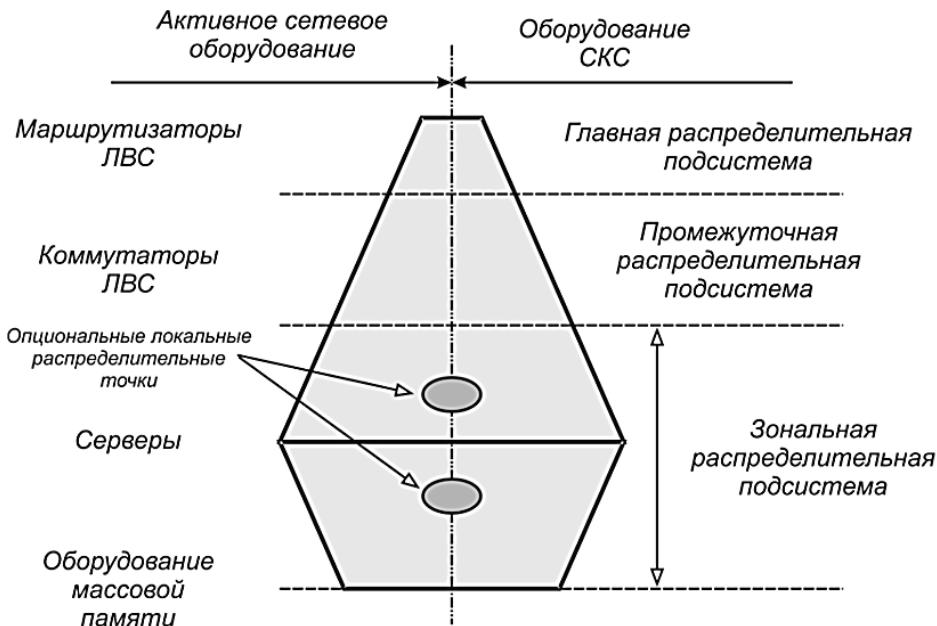


Рисунок 4 – Модифицированная иерархическая схема
структурированной кабельной системы

Потенциально возможны иные варианты реализации информационной кабельной системы [3, С.14;4, С.41;5, С.5], но модульно-кассетный подход наилучшим образом отвечает функциям машинного зала и условиям его эксплуатации, в результате его занимает в этой области доминирующее положение [10, С.65]. Применительно к рассматриваемой теме это означает потенциальное появление в информационной инфраструктуре двух главных кроссов. При этом кросс, обслуживающий сеть SAN (от англ. (англ. Storage Area Network – Сеть Хранения Данных, СХД) системы хранения данных (массовой памяти) занимает подчиненное положение хотя бы из соображений того, что не имеет обязательной прямой связи с «с внешним миром».

Известен ряд подходов к составлению классификации ЦОД (по площади машинного зала, по потребляемой мощности и т.д.). В данном случае обратимся к классификации ИКС-холдинга: все ЦОД делятся на шесть основных категорий по количеству обслуживаемых стоек. Результаты показаны на рисунке 5 и свидетельствуют о том, что свыше 90% всех объектов относятся к мини и малым ЦОД, оборудование которых размещается в одном машинном зале, а обслуживающая их СКС не требует масштабного центрального кросса. Последний оптимизируется преимущественно под объекты с максимум 200 стойками.

Однако, сформировавшиеся на рынке тренды свидетельствуют о

- несколько более высоком росте количества ЦОД масштаба средний и выше;
- быстром росте общего количества ЦОД;
- не менее быстром росте количества корпоративных ЦОД.

В этой ситуации появляется объективная потребность в создании специализированной конструкции центрального кросса.

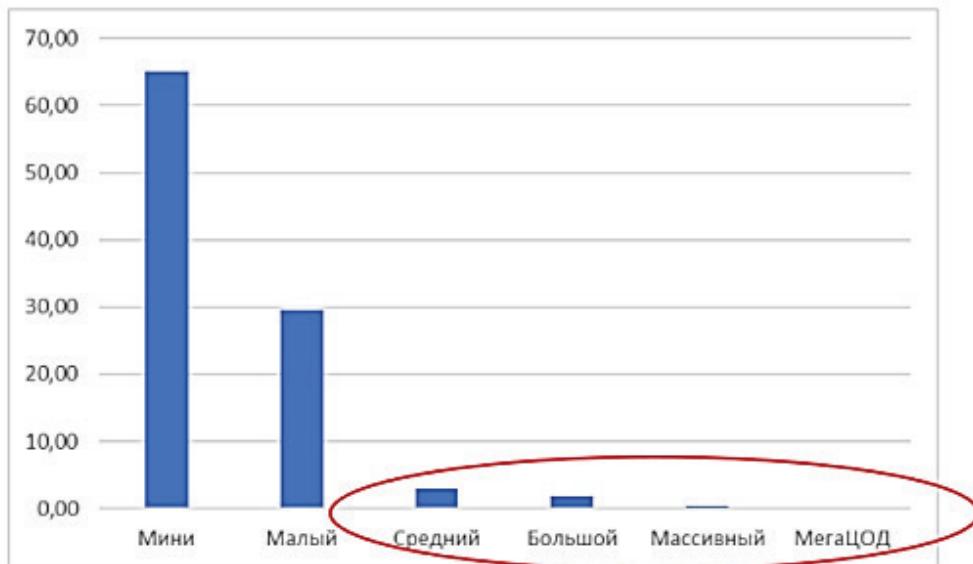


Рисунок 5 – Категории центров обработки данных по количеству обслуживаемых стоек

При реализации центрального кросса СКС для машинного зала ЦОД, структурная схема которого показана на рисунке 6, из соображений достижения максимально полной степени унификации целесообразно применять элементную базу для кроссов коммутационных узлов более низкого уровня.

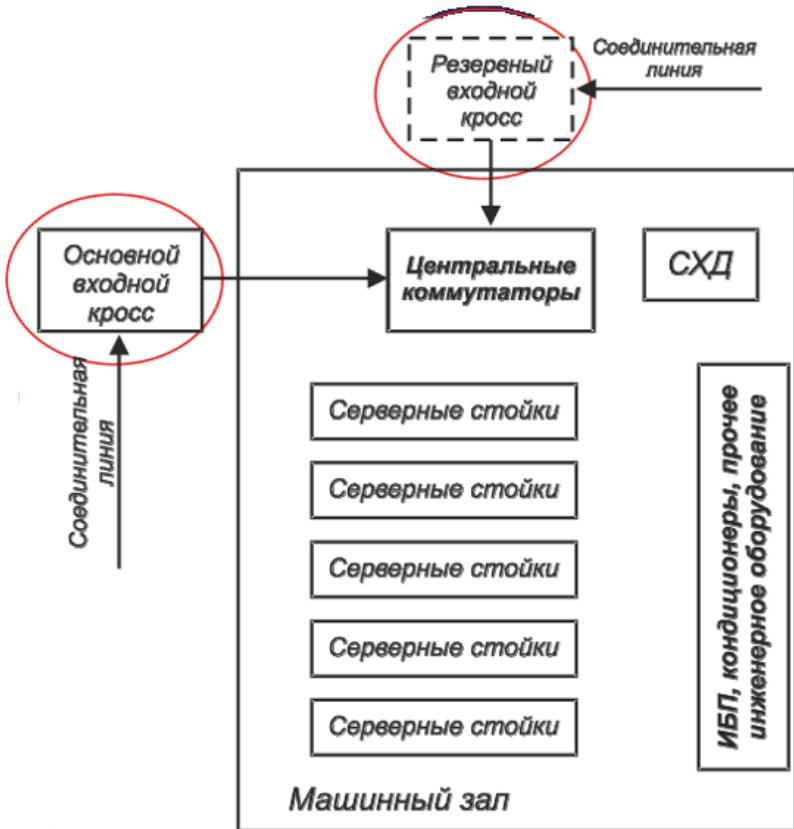


Рисунок 6 – Типовая схема машинного зала центра обработки данных

Необходимость применения в СКС корпоративного ЦОД специализированного кросса обусловлена следующими обстоятельствами:

- наращиванием объемов активного сетевого оборудования верхнего уровня и опережающего роста числа обслуживающих их функционирование кабельных связей по сравнению с соединительными линиями операторов связи;
- значительным увеличением популярности применения заметно более требовательных в части числа соединений структур типа spine-leaf, создание которых сопряжено с резким увеличением количества обслуживаемых стационарных линий СКС.

Последние выгодны тем, что дают принципиально меньшую задержку передачи сигнала между серверами, что чрезвычайно важно при распараллеливании процесса обработки поступающего запроса.

В таких условиях популярные ранее многоволоконные кроссы операторского класса оказываются «на чужой территории», и возникает вопрос о целесообразности создания специальной разновидности оборудования.

Структура ИТС типа Spine-Leaf отличается от традиционной тем, что обеспечивает гарантированное сокращение количества коммутаторов при взаи-

модействии двух и более серверов при параллельной обработке пользовательского запроса. Сопровождается значимым увеличением затрат на СКС за счет увеличения количества организуемых линий. Из-за относительно небольшого объема затрат на информационную проводку применение этой схемы построения физического и канального уровней ИТС обеспечивает опережающее наращивание технико-эффективности функционирования ЦОД и быстрый рост популярности ее внедрения в реальные проекты.

Из схемы, показанной на рисунке 7, вытекает, что нормальная текущая эксплуатация СКС в случае применения схемы Spine-Leaf в части выполнения процедур MAC (от англ. Move, Add, Change – Переместить, Добавить, Изменить) возможна только в случае наличия дополнительного кросса.

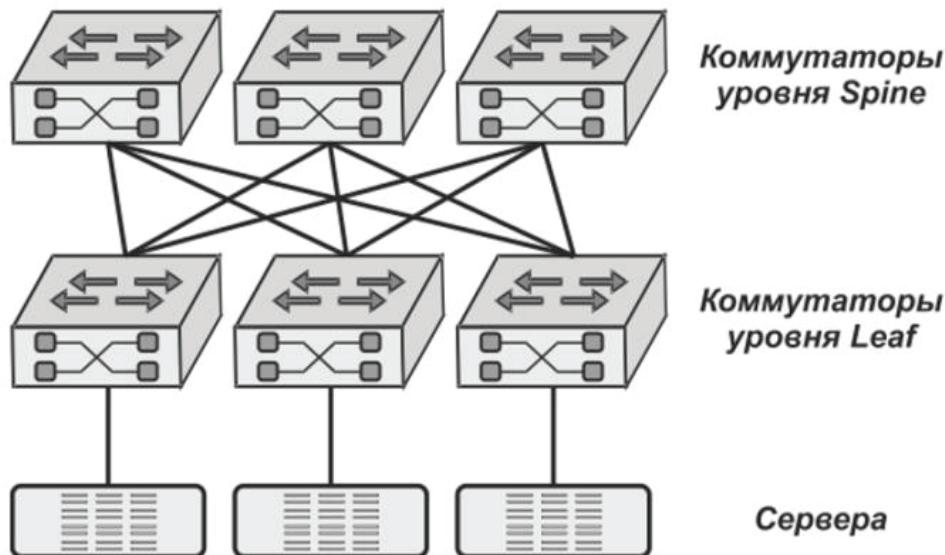


Рисунок 7 – Взаимодействие серверов с коммутационным оборудованием

Дополнительный кросс, расположение которого показано на рисунке 8, с учетом количества коммутируемых линий конструктивно напоминает центральный кросс.

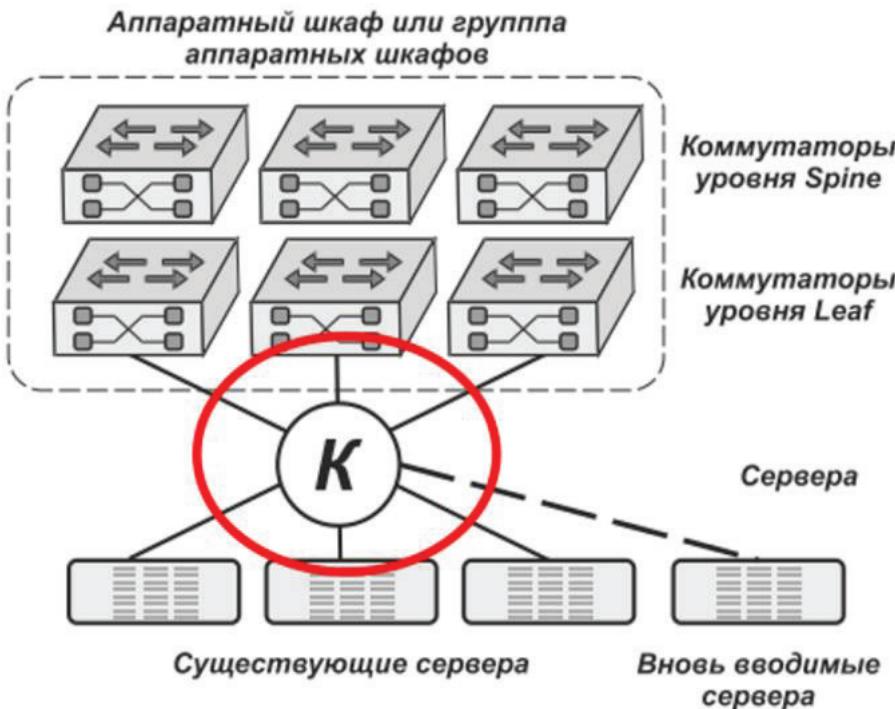


Рисунок 8 – Обеспечение выполнения процедур MAC с помощью дополнительного кросса

В результате этого значительно стимулируется объем внедрения этой техники в проекты, которая потенциально может быть хотя бы частично унифицирована с обычным центральным кросом.

Таким образом, появление в массовой практике реализации проектов специализированных конструкций центральных кроссов носит объективный характер и является прямым следствием эволюционного развития техники как в части количественного абсолютного роста и увеличения относительных объемов построения крупных ЦОД, так и перехода на схемы spine-leaf реализации информационной инфраструктуры машинного зала.

Специализированные центральные кроссы ODF(от англ. Optical Distribution Frame – Оптический Распределительный Щит) для ЦОД конструктивно значительно отличаются от своих аналогов для телеком-операторов, что позволяет заметно лучше адаптировать их к условиям эксплуатации информационной проводки машинного зала.

Специализированные ODF при надлежащем исполнении конструкции и применения специализированных организаторов в случае обращения к стойкам шириной не менее 800 мм позволяют выполнять коммутацию шнурами одинаковой длины.

На ранних этапах развития СКС [6, С.53] для машинных залов в качестве центрального кросса использовались конструкции операторского класса, известные как ODF и имеющие характерное для телекоммуникационных компаний «безоболочечное» исполнение. Возможность отказа от оболочки обеспечивалась

тем, что вилки шнурков были ориентированы параллельно плоскости кросса и не выступают за габарит кассеты.

Фотография такого кроссового устройства приведена на рисунке 9.



Рисунок 9 – «Безболочечное» исполнение центрального кросса

Целесообразность обращения в машинном зале ЦОД к ранее отработанным решениям определялась

- крайне небольшой емкостью этого сегмента рынка, что резко увеличивало срок окупаемости новой разработки;
- возможность решения проблемы создания центрального кросса через готовую конструкцию, которая просто заимствовалась из смежной телеком-области как наиболее подходящая по своим параметрам и свойствам для применения в проекте построения кабельной системы машинного зала ЦОД;
- применением на соединительных линиях операторов связи техники, которая элементарно привычна для специалистов-связистов.

По мере наработки опыта построения телекоммуникационной инфраструктуры машинного зала ЦОД и решения остальных проблем [7, С.47] начала проявляться необходимость в разработке специализированной конструкции цен-

трального кросса. Это было связано с рядом факторов, основные из которых сводятся к таким положениям как:

- непривычность интерфейса операторских кроссов за счет боковой ориентации осей розеток кассет (рисунок 10), которые при коммутации необходимо дополнительно откidyвать вбок;
- несоответствие концепции высокоплотного операторского кросса модельно-кассетному подходу СКС, применяемому для машинного зала ЦОД, что затрудняло использование на разных уровнях СКС однотипной элементной базы (эффект «белой вороны»);
- MDF операторского уровня никоим образом не предполагает установки и обслуживание активного сетевого оборудования;
- целесообразность наличия потенциальной возможности обслуживания также медножильных линий.



Рисунок 10 – Боковая ориентация осей розеток кассет

Устранение столь большого количества крайне разноплановых недостатков в существующей конструкции если не невозможно вообще, то по крайней мере довольно затруднительно.

В конце концов объем нововведений становится настолько большим, что происходит качественный переход: появляется необходимость и целесообразность выполнения новой разработки. Необходимость разработки специализированной конструкции центрального кросса машинного зала ЦОД объективна и обусловлена зрелостью этого технического направления, а также значимым отличием системных технических решений внутриобъектовых информационных систем и сетей связи общего пользования.

Зрелость ЦОД как технического направления определяется его выделением в самостоятельную область деятельности, что подтверждается наличием многочисленных профильных стандартов. В таких условиях после решения основных задач появляется необходимость решения частных, одной из которых является центральный кросс.

При этом из-за того, что ЛВС как техника связи сформировалась на несколько десятков лет позднее телефонных и телеграфных сетей, в ней

- отсутствует необходимость поддержки техники доставки данных прошлых «докомпьютерных» поколений;
- значительная часть задач коммутаций, которые можно рассматривать как относительно медленный процесс, может быть решена чисто программными методами (отсюда многочисленные протоколы ЛВС), что немедленно требует более интенсивных переключений на физическом уровне.

Исторически в сетях связи общего пользования применяется деление на первичную и вторичную сети. Коммутация происходит на уровне вторичной сети, которая использует ресурсы первичной сети исключительно для транспорта данных из заданной точки А в заданную точку В, что значительно снижает частоту физической коммутации шнурами.

При разработке проекта построения информационной инфраструктуры машинного зала ЦОД применяется комбинированная схема, которую можно разделить на две основные стадии.

Задача первой стадии – принятие стратегического решения, т.е. в процессе ее выполнения определяется общая укрупненная схема информационной инфраструктуры. Реально она сводится к альтернативе в части выбора между классической структурой и структурой типа *top of rack* (верхняя часть стойки).

На второй стадии осуществляется наполнение предполагаемой структуры конкретными компонентами.

Иначе говоря, разработка технических решений в основной своей массе осуществляется в направлении снизу – вверх, как показано на рисунке 11, причем информация от предыдущего этапа частично используется в качестве исходных данных последующего.

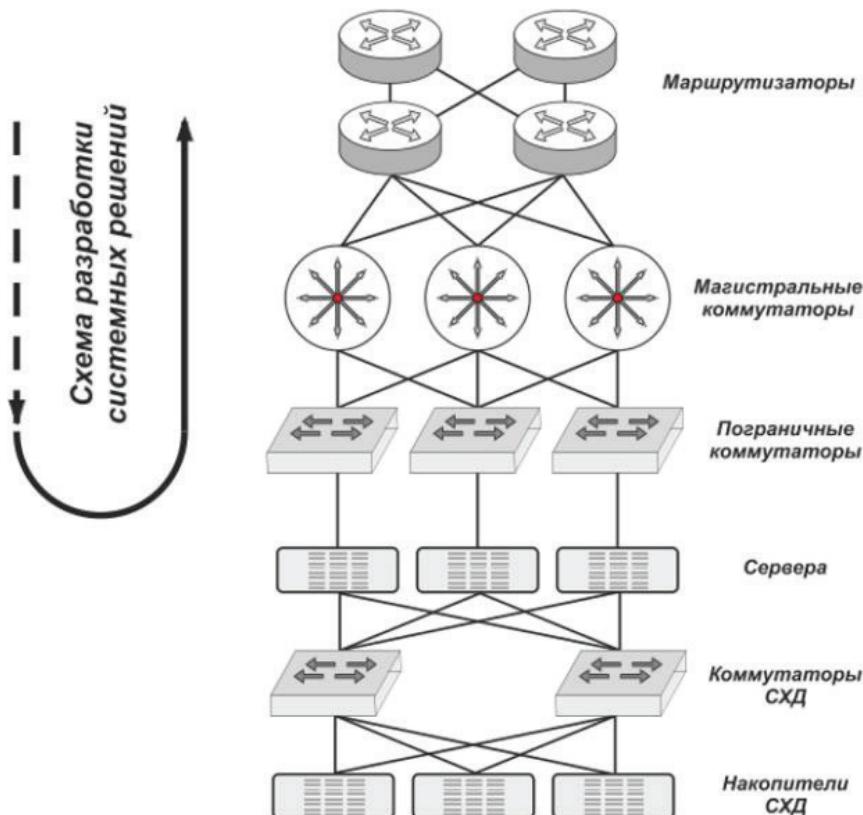


Рисунок 11 – Разработка технических решений проектирования центра обработки данных «снизу – вверх»

При рассмотрении телекоммуникационной структуры машинного зала ЦОД исходим из ее 2-уровневого построения (третий верхний уровень обеспечивает связь отдельных машинных залов масштабного ЦОД), а также построения нижнего уровня по схеме double end-of-rack [13, С.102].

Не рассматриваются структура Top of rack из-за ее малой функциональной гибкости.

Анализируется только ЛВС (на рисунке 12 она обозначена LAN), в основу SAN положены аналогичные принципы, сама сеть хранения данных из-за специфики ее функционирования обычно крайне меньше ЛВС.

Оборудование системы SAN хранения данных по своим массогабаритным параметрам считается аналогичным оборудованию ЛВС и также учитывается, но отдельно и подробно не рассматривается. При необходимости считается, что его исполнение и объемы применения совпадают с аналогичными показателями аппаратуры сети ЛВС.

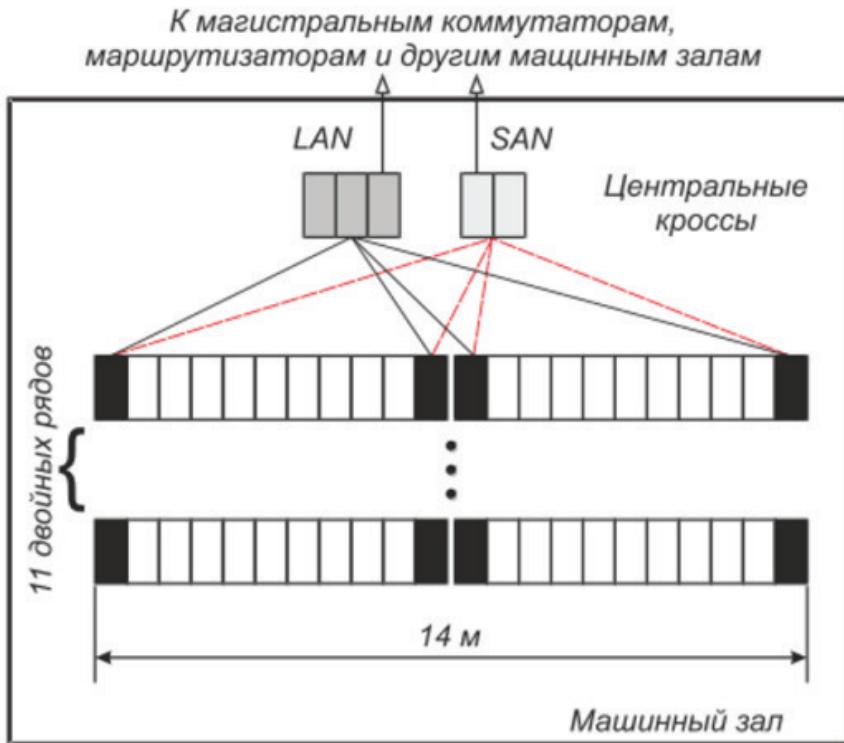


Рисунок 12 – Геометрическая модель машинного зала центра обработки данных

Нагрузка распределительных щитов питания на уровне стойки влияет на точность CFD-модели. Распределение стоек для машинного зала ЦОД, для которого будет строиться CFD-модель, показано на рисунках 13 и 14.

С учетом составленной геометрической модели машинного зала ЦОД, приведенной на рисунке 11, схемы модифицированной иерархической системы (рисунок 4), расположения основного и дополнительного кроссов (рисунок 8), расположения аппаратных и серверных стоек (рисунки 13,14) и их количества, с помощью программного обеспечения TileFlow 7.5 проведено CFD-моделирование машинного зала ЦОД.

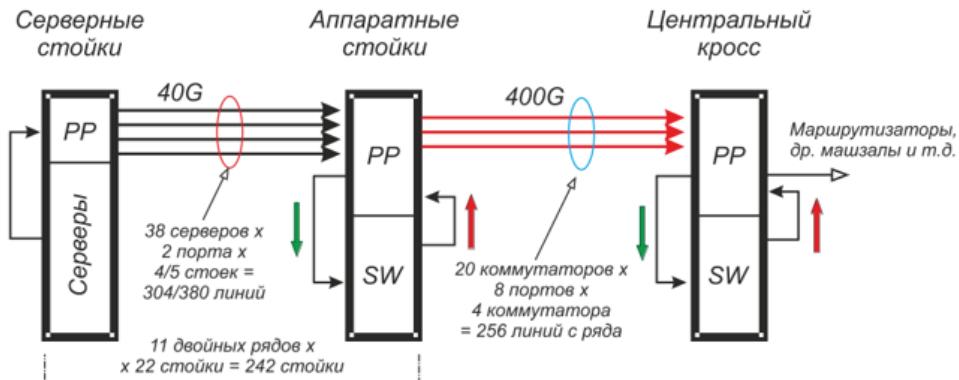


Рисунок 13 – Распределение серверных и аппаратных стоек

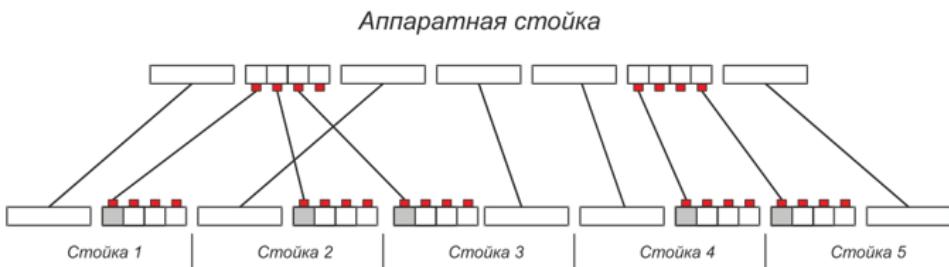


Рисунок 14 – Конфигурация аппаратных стоек

Ввод исходных данных в программе TileFlow 7.5 показан на рисунке 15.

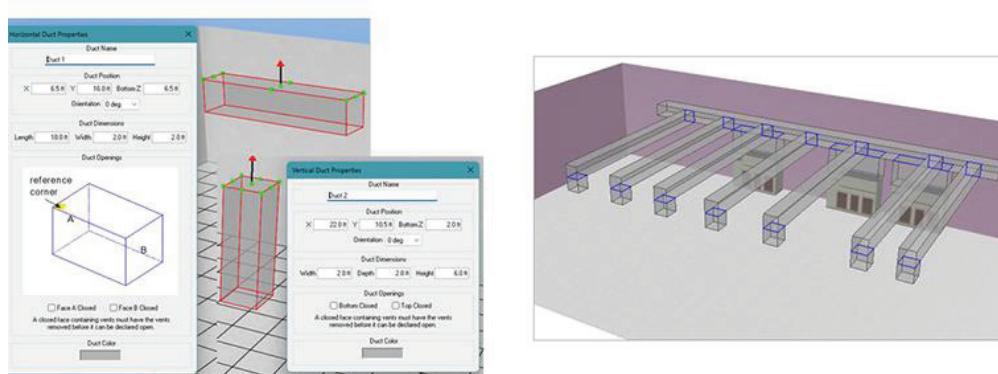


Рисунок 15 – Интерфейс программы TileFlow 7.5

Программа TileFlow 7.5 дает возможность не только построения 3D-моделей оборудования машинного зала, но и возможность расчета графоаналитических зависимостей в виде 2D-моделей, характеризующих распределение температуры, давления, влажности, скорости и направление движения воздушных масс в машинном зале, как показано на рисунке 16. Результаты CFD-

моделирования систем кондиционирования для предложенной конфигурации машинного зала ЦОД на 80 стоек показаны на рисунке 17.

На рисунке 17 а показан момент, когда температура воздушных потоков в ЦОД достигла критического значения (свыше 85° по шкале Фаренгейта), и включается система охлаждения. На рисунке 17 б показан момент, когда оборудование машинного зала охлаждено до 60° по шкале Фаренгейта. Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха ASHRAE указывает диапазон температур от 64 до 81°F (или от 18 до 28°C) оптимальной для машинных залов ЦОД [14, С.78;15, С.51]. Система кондиционирования отключается при заданном значении охлаждения и включается вновь, когда оборудование машинного зала разогревается выше допустимого значения.

Результаты CFD-моделирования системы кондиционирования машинного зала применяются не только демонстрации распределения скорости потоков воздуха в машинном зале и вычисления температуры на входе в стойку, но также показывает динамику движения, давления и температуры воздуха.

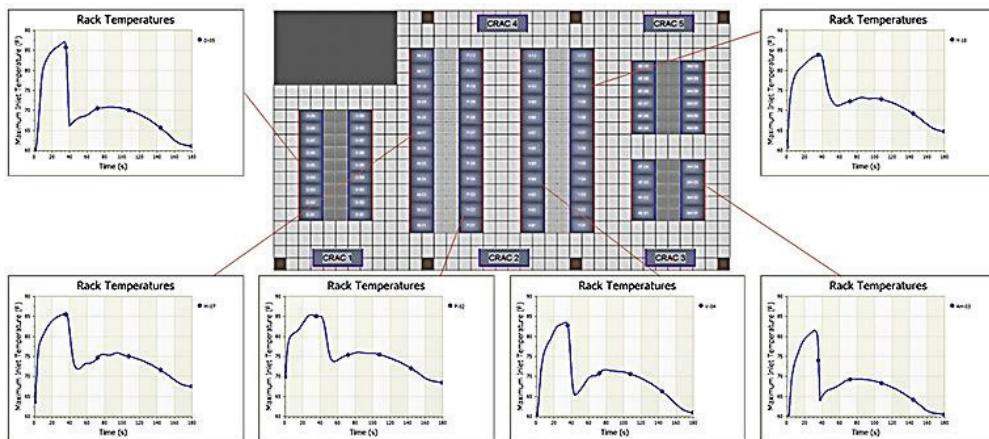


Рисунок 16 – 2D-модели распределения характеристик микроклимата машинного зала

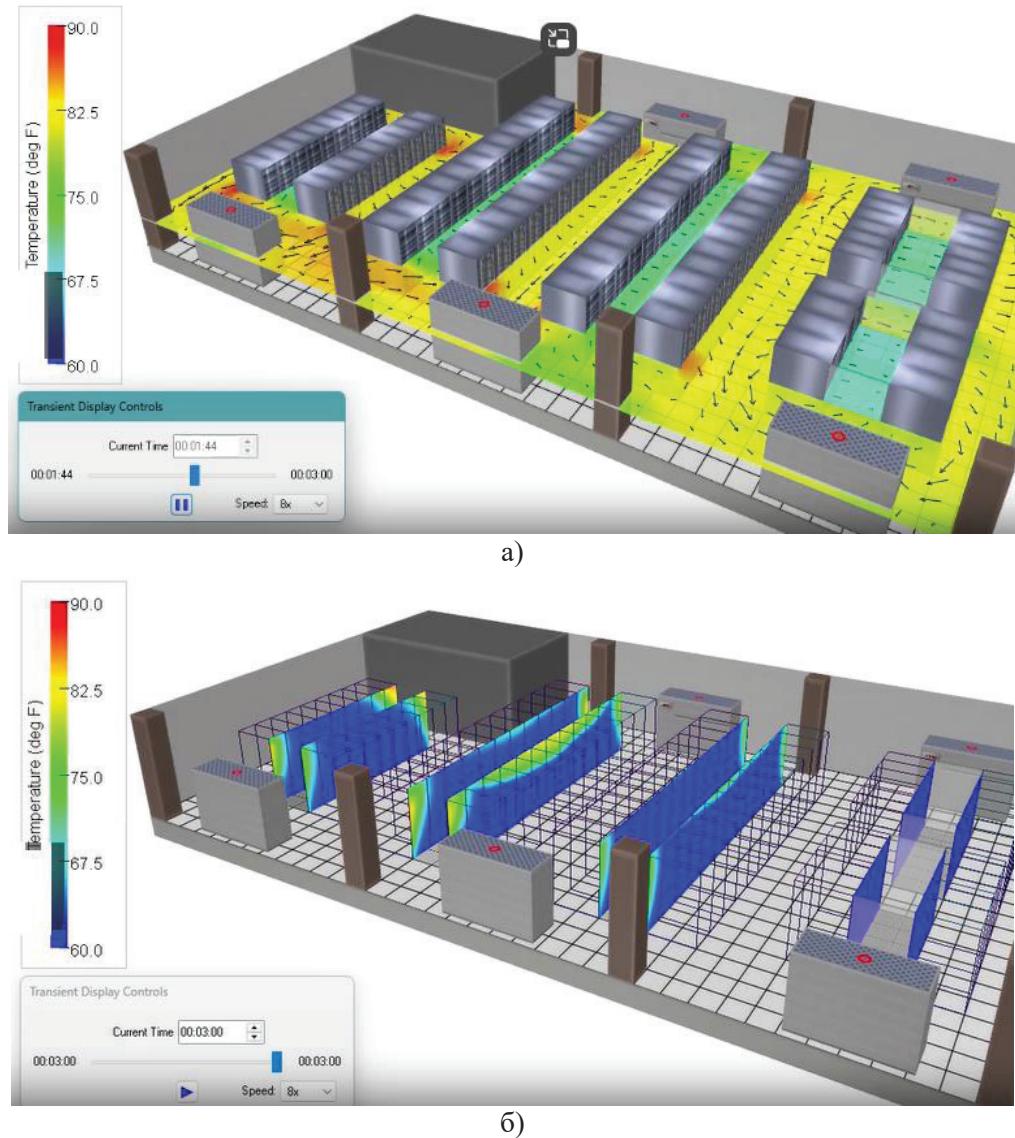


Рисунок 17 – Результаты CFD-моделирования

На основе балансового моделирования охлаждения машинного зала делается балансовый расчет для сертификации TIER (от англ. Tier Standard – система сертификации ЦОД). Стоимость электроэнергии, затраченной на охлаждение, может достигать 40 процентов от общего потребления энергии центром обработки данных. CFD-моделирование помогает оптимизировать работу системы охлаждения и экономить электроэнергию.

Заключение

Применение в машинном зале ЦОД центральных кроссов со специализированной конструкцией позволяет нарастить удобство текущего управления ка-

бельной системой как при традиционной схеме построения информационной инфраструктуры машинного зала, так и, в особенности, при переходе на перспективную 2-уровневую архитектуру со схемой spine-leaf.

Методом CFD-моделирования доказано, что применительно к классической рядной структуре расположения монтажных шкафов при формировании системы холодных и горячих коридоров применение центральных кроссов со специализированной конструкцией не влияет на температурные характеристики пространства машинного зала и не вызывает проблем с обеспечением рекомендуемых ASHRAE параметров окружающей среды.

Система кондиционирования машинного зала не нуждается в изменениях принципов реализации при электрической нагрузке отдельно взятой стойки вплоть до 35 кВт при количестве серверных стоек в машинном зале не свыше 80 штук.

Литература

1. Аббасова Т.С. Задачи оптимизации инфокоммуникационных систем // Информационно-технологический вестник. 2018. № 3(17). С. 55-65.
2. Аббасова Т.С. Оптимизация и стандартизация оптической среды взаимодействия вычислительных комплексов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 1. С. 86-99.
3. Аббасова Т.С. Совмещение управляющих и измерительных функций при интерактивном управлении телекоммуникационными системами // Информационно-технологический вестник. 2015. №2(04). С. 14-18.
4. Аббасова Т.С., Аббасов Э.М. Методика контроля межкабельной переходной помехи в электропроводных каналах кабельных систем // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. №4. С. 40-43.
5. Аббасова Т.С., Гурин Д.В., Ребрунова А.И., Аббасов Э.М. Построение эластичной промышленной среды на собственных аппаратных ресурсах для облачных приложений // Эволюционные процессы информационных технологий. Сборник научных статей по материалам 8-й Международной научно-технической конференции 4 апреля 2023. Бургас: Изд-во ИГНЭИТ, 2023. С.4-12 (178 с).
6. Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Эффективность защиты от внешних помех электропроводных каналов структурированных кабельных систем для передачи высокоскоростных информационных приложений // Информационные технологии. 2014. №5. С. 52-57.
7. Артюшенко В.М., Акимкина Э.Э. Имитационная модель адаптивной системы поддержки принятия решений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 2. С. 46-56.
8. Артюшенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Пути наращивания эффективности инфокоммуникационных систем: монография / Под научной редакцией А.Б. Семенова. М.: Издательство «Научный консультант», 2019. 232 с.

9. Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Развитие централизованной оптической архитектуры кабельных систем для вычислительных комплексов // Информационно-технологический вестник. 2016. №2(08). С. 117-129.
10. Семенов А.Б., Аббасова Т.С., Аббасов Т.Э. Оценка эффективности гиперконвергентных решений при обработке больших данных // Информационно-технологический вестник. 2023. № 2(36). С.63-75.
11. Семенов А.Б., Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Введение в структурированные кабельные системы: учебное пособие / под редакцией д.т.н. профессора Семенова А.Б. М.: Издательство «Научный консультант», 2018. 206 с.
12. Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Технические средства увеличения эффективности администрирования волоконно-оптических коммуникаций с помощью LC-разъема // Информационно-технологический вестник. 2019. №3(21). С.22-32.
13. Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Функциональные возможности и конструктивные особенности оптических разъемов LC для современных инфокоммуникационных систем // Информационно-технологический вестник. 2019. №4(22). С.98-107.
14. Семенов А.Б., Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Проектирование и расчет мультисервисных кабельных систем: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2019. 174 с. (Высшее образование: Бакалавриат).
15. Семенов А.Б., Зубилевич А.Л., Аббасова Т.С. Влияние конструктивных особенностей симметричных цепей передачи данных на процесс оптимизации физического уровня // Информационно-технологический вестник. 2018. №3(17). С. 99-107.

УДК 51-72; 544.65

Электроэкстракция цинка. Математическое моделирование в одномерном приближении

Виолетта Юрьевна Чебакова, кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры анализа данных и технологий программирования,

Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования

Казанский (Приволжский) федеральный университет,

ФГАУ ВО КФУ, старший научный сотрудник

Института прикладных исследований Академии наук

Республики Татарстан, ИПИ АН РТ, г. Казань

В данной работе предложено использование модифицированного алгоритма потоковой прогонки для уравнений диффузии – конвекции при непостоянных коэффициентах в задачах переноса заряженных частиц в электролите. Данный метод позволяет вместе с решением находить значение потока заряженных частиц, что позволяет избежать большой вычислительной погрешности при вычислении потока с помощью численного дифференцирования решения. Численный алгоритм опробован на решения математической модели электроэкстракции цинка из 20% раствора гидроксида натрия в одномерном приближении.

Потоковая прогонка, большие градиенты решения, уравнения конвекции диффузии, электроэкстракция цинка.

Electroextraction of zinc. Mathematical modeling in one-dimensional approximation

Violetta Yur'evna Chebakova, Candidate of Science of Physics and Mathematics,

Associate professor at the Department of Data Analysis and Programming,

Technologies Federal State Autonomous Institution for Higher Education

«Kazan (Volga region) Federal University», KFU, Kazan,

Senior Researcher at the Institute of Institute of Applied Research

of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

In this paper, we propose the use of a modified flow-through algorithm for diffusion-convection equations with variable coefficients in problems of charged particle transport in an electrolyte. This method allows us to find the value of the charged particle flux together with the solution, which avoids a large computational error in calculating the flux by numerically differentiating the solution. The numerical algorithm has been tested to solve a mathematical model of zinc electroextraction from a 20% sodium hydroxide solution in a one-dimensional approximation.

Flow-through, large gradients of solution, convection diffusion equations, electroextraction of zinc.

Введение

Металлические сплавы на основе цинка широко исследуются на возможность применения в медицине для изготовления имплантатов, так как цинк обладает умеренной способностью к разложению, приемлемой биосовместимостью и биологически активными свойствами. Возможность применения цинка и сплавов на его основе для производства имплантатов исследовалась в работах [9, 18]. Традиционные производственные процессы изготовления индивидуальных имплантатов, сталкиваются с серьезными ограничениями, например, пористые каркасы для тканевой инженерии. В работе [13] предлагается технология лазерного наплавления в порошковом слое (L-PBF) для надежного изготовления металлических имплантатов из сплавов на основе цинка. Данный метод аддитивного производства позволяет изготавливать имплантаты с индивидуальной структурой, которая будет соответствовать конкретным потребностям пациента. Так же исследовалась влияние состава сплавов на коррозию, повышающую концентрацию Zn^{2+} в костной ткани.

В работе [14] дан обзор по методам 3D печати для изготовления индивидуальных ортопедических имплантатов из металлов и биометаллов. В ней сплавы на основе цинка рекомендованы для изготовления костных винтов, несущих деталей костных пластин. Данные рекомендации даны из-за цитотоксичности цинка, отсутствия газообразования, высокой биосовместимости. При этом чистый цинк в силу низкой механической прочности используется редко, чаще используются сплавы на его основе, полученные с добавлением других металлических элементов (например, Mg, Ca и Sr). В работе [16] приведено исследование физико-химических и биологических эффектов легирования цинка в волластонитовой биокерамике, используемой для глазных протезов. Результаты экспериментов показали, что при замене в составе сплава части кальция на цинк (до 9%) можно значительно улучшить спекаемость и механические свойства. В работе [15] отмечено применения сплавов на основе цинка для печати сердечно-сосудистых стентов и зубных имплантатов технологией селективного (выборочного) лазерного плавления.

Одним из методов получения чистого цинка из обедненных и полиметаллических руд или отходов металлургического производства является электроэкстракция. При этом возможно одновременное с цинком получение кадмия, индия, галлия и ряда концентратов других металлов из полиметаллических руд. Электрохимическая система процесса электроэкстракции включает катод, электролит и нерастворимый анод. Растворы обычно получают путем избирательного растворения (выщелачивания) металлсодержащих руд, рудных концентратов или промежуточных продуктов металлургического производства.

В данной работе предложена математическая модель электроэкстракции цинка из 20% раствора гидроксида натрия, описаны особенности процесса электролиза, осложняющие численное решение данной модели, предложен и обоснован модифицированный метод потоковой прогонки для ее решения.

Математическое описание процесса электроэкстракции цинка из обедненной руды

1.1 Уравнения в объеме электролита

Основные положения математической модели процесса электроэкстракции цинка из щелочного электролита приведено в работе [6]. Для эксперимента, также как и в работе [6], приготовление электролита производится выщелачиванием цинка из руды раствором гидроксида натрия (20%) с общей реакцией $2NaOH + Zn + 2H_2O \rightarrow Na_2[Zn(OH)_4] + H_2$. При этом тетрагидроксоцинкнат натрия полностью диссоциирует на ионы в растворе [19,20] $Na_2[Zn(OH)_4] \rightarrow 2Na^+ + [Zn(OH)_4]^{2-}$.

Математическая модель между плоскими параллельными инертными электродами будет содержать следующие дифференциальные уравнения второго порядка:

1. Уравнение диффузии - конвекции для ионов водорода

$$\frac{\partial C_{H^+}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_{H^+} \frac{\partial C_{H^+}}{\partial x} + U_{H^+} C_{H^+} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = R_1 C_{H_2O} - R_2 C_{OH^-} C_{H^+} \quad (1)$$

Здесь C_{H^+} – значение концентрации ионов водорода, D_{H^+} – коэффициент диффузии ионов водорода, U_{H^+} – коэффициент подвижности ионов водорода, φ – потенциал электрического поля, R_1 – константа диссоциации воды, R_2 – константа ассоциации ионов гидроксидной группы и водорода в молекуле воды.

2. Уравнение диффузии – конвекции для гидроксильной группы

$$\frac{\partial C_{OH^-}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_{OH^-} \frac{\partial C_{OH^-}}{\partial x} - U_{OH^-} C_{OH^-} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = R_1 C_{H_2O} - R_2 C_{OH^-} C_{H^+}$$

Здесь C_{OH^-} – значение концентрации ионов гидроксильной группы, D_{OH^-} – коэффициент диффузии ионов гидроксильной группы, U_{OH^-} – коэффициент подвижности гидроксильной группы,

3. Уравнение диффузии – конвекции для ионов натрия

Несмотря на то, что ионы натрия в процессе электролиза не имеет дополнительного источника поступления в электролит, а также не рекомбинируют, они являются основными переносчиками заряда, накапливаясь у отрицательно заряженного электрода.

$$\frac{\partial C_{Na^+}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_{Na^+} \frac{\partial C_{Na^+}}{\partial x} + U_{Na^+} C_{Na^+} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = 0$$

Здесь C_{Na^+} , D_{Na^+} , U_{Na^+} – значения концентрации, коэффициента диффузии и коэффициента подвижности ионов натрия.

4. Уравнение диффузии – конвекции для тетрагидроксоцинкнат анионов

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{[Zn(OH)_4]^{2-}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_{[Zn(OH)_4]^{2-}} \frac{\partial C_{[Zn(OH)_4]^{2-}}}{\partial x} \right. \\ \left. - U_{[Zn(OH)_4]^{2-}} C_{[Zn(OH)_4]^{2-}} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

Здесь $C_{[Zn(OH)_4]^{2-}}$, $D_{[Zn(OH)_4]^{2-}}$, $U_{[Zn(OH)_4]^{2-}}$ – значения концентрации,

коэффициента диффузии и коэффициента подвижности тетрагидроксицинката анионов.

5. Уравнение для потенциала электрического поля в приближении его однородности вдоль электродов

$$\frac{1}{F} \frac{\partial}{\partial x} ((1 + \chi) \varepsilon_0 E) = (C_{Na^+} + C_{H^+} - C_{OH^-} - C_{[Zn(OH)_4]^{(2-)}})$$

Здесь χ – электрическая восприимчивость среды, ε_0 – диэлектрическая постоянная, F – постоянная Фарадея, $E = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ – напряженность электрического поля.

Замыкающие соотношения:

Уравнение для молекул воды в общем виде записывается как:

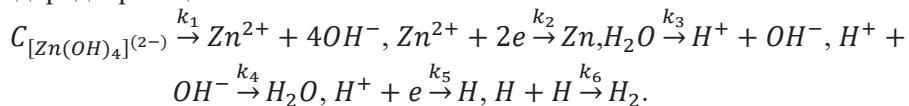
$$\frac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_{H_2O} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial x} \right) = -R_1 C_{H_2O} + R_2 C_{OH^-} C_{H^+}$$

Так как константы диссоциации и ассоциации воды очень малы, а перенос воды не влияет на перенос заряда, то при решении модельной задачи концентрацию воды будем считать постоянной.

Ионное произведение воды $K_W = C_{H^+} * C_{OH^-}$ при неизменных условиях постоянно. Подвижность ионов U может быть выражена через эквивалентную проводимость Λ как: $\Lambda = UF$.

1.2. Границные условия на катоде и аноде

Электролиз относится к гетерогенным процессам, и основные реакции приходятся на границу раздела сред, а именно между поверхностью жидкого электролита и металлического электрода. На катоде одновременно выделяются цинк и водород в реакциях:



Здесь $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – константы скоростей перечисленных стадийных электрохимических реакций. Математическое описание катодных процессов выражается системой кинетических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} = -k_3 C_{H_2O} \\ \frac{\partial C_{H^+}}{\partial t} = k_3 C_{H_2O} - k_5 C_{H^+} \\ \frac{\partial C_H}{\partial t} = k_5 C_{H^+} - k_6 C_{H^+} C_{H^+} \\ \frac{\partial C_{H_2}}{\partial t} = k_6 C_{H^+} C_{H^+} \\ \frac{\partial C_{Zn(OH)^{2-}}}{\partial t} = k_7 - k_1 C_{Zn(OH)^{2-}} \\ \frac{\partial C_{Zn^{2+}}}{\partial t} = k_1 C_{Zn(OH)^{2-}} - k_2 C_{Zn^{2+}} \\ \frac{\partial C_{Zn}}{\partial t} = k_2 C_{Zn^{2+}} \\ * \end{array} \right. \quad (2)$$

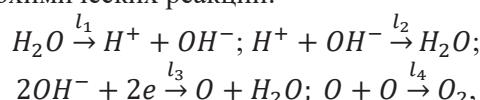
Константы скоростей стадийных приэлектродных процессов рассчитаны, опираясь на работы [5, 6, 8, 11]. Так же учитывая результаты работы [4], где k_4 практически была равно нулю, этот стадийный процесс в данной системе не учитываем. Ионы Na на катоде не выделяются, просто происходит их перераспределение в межэлектродном пространстве с повышением значения их концентрации к катоду и уменьшением к аноду. Для ионов натрия ставим условие на непрерывность потока с учетом того, что конвекция превышает диффузию.

$$G_{Na^+}|_{\text{катод}} = U_{Na^+} C_{Na^+} \frac{\partial}{\partial x} \varphi$$

Для уравнения Пуассона граничное условие на катоде ставим, исходя из уравнения Нернста:

$$\varphi|_{x=0} = E_{0, \text{катода}} + \left| \frac{RT}{F} \right| \ln(C_{H^+} C_{Zn^+} / C_H)$$

На аноде происходит разложение воды, которое осуществляется по следующей схеме электрохимических реакций:



где l_1, l_2, l_3, l_4 это константы скоростей анодных приэлектродных электрохимических реакций.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} = -l_1 C_{H_2O} + l_2 C_{H^+} C_{OH^-} + l_3 C_{OH^-}^2; \\ \frac{\partial C_{OH^-}}{\partial t} = l_1 C_{H_2O} - l_2 C_{H^+} C_{OH^-} - l_3 C_{OH^-}^2; \\ \frac{\partial C_O}{\partial t} = l_3 C_{OH^-}^2 - l_4 C_O^2; \\ \frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} = l_4 C_O^2; \\ \frac{\partial C_{H^+}}{\partial t} = l_1 C_{H_2O} - l_2 C_{H^+} C_{OH^-} \end{array} \right. \quad (3)$$

Значение концентрации ионов натрия в анодном пространстве примем равной нулю.

$$G_{Na^+}|_{\text{анода}} = 0$$

Для уравнения относительно потенциала электрического поля граничное условие на аноде ставим также исходя из уравнения Нернста:

$$\varphi|_{\text{анода}} = E_{0, \text{анода}} + \left| \frac{RT}{F} \right| \ln(1/C_{OH^-})$$

Для тетрагидроксицинката анионов будем записывать, как

$$C_{[Zn(OH)_4]^{(2-)}}|_{\text{анод}} = U_{[Zn(OH)_4]^{(2-)}} C_{[Zn(OH)_4]^{(2-)}} \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

При прохождении электрического тока через гетерогенную систему, состоящую из металлических электродов и жидкого электролита, основные процессы проходят на границе раздела сред, где наблюдается сильная неравновесность концентраций. По мере удаления от приэлектродных областей, в следствии поляризации среды, ионы в большей степени оказываются связанными. А вследствии малости констант диссоциации и ассоциации, в этой области ионная концентрация определяется только диффузионно-миграционным переносом. В приэлектродных областях наблюдается преобладание дрейфовых процессов над диффузионными процессами и сильное изменение значений характеристик, таких как значение концентрации, напряжение [10,17]. Таким образом, построенная математическая модель имеет сильные градиенты решений данных начально-краевых задач и краевой задачи, что значительно затрудняет ее решение. Так же одной из характеристик для сравнения экспериментальных и расчетных значений является вольтамперная характеристика (ВАХ), это зависимость между полным током через газоразрядный промежуток и напряжением на нем. При этом общий ток, складывающийся суммарно из потоков всех заряженных частиц, в каждой точке пространства данной гетерогенной системы должен быть одинаков.

Численный метод решения

Алгоритм решения заключается в последовательном численном решении начально-краевых задач переноса заряженных частиц и краевой задачи нахождения потенциала, при этом на границе дополнительно решается система задач Коши методом Рунге-Кутта четвертого порядка. Построение разностной схемы дифференциальных уравнений и решение получившейся системы алгебраических уравнений рассмотрим на примере начально-краевой задачи диффузии – миграции ионов водорода. Данная задача, как было отмечено выше, обладает рядом особенностей, усложняющих ее решение:

1) Большие градиенты концентрации в приэлектродных областях, что приводит к вычислительной ошибке при численном вычислении потока частиц в приэлектродных областях

2) Смена преобладающих процессов. Так область с преобладанием связанный диффузии в центре межэлектродного промежутка соседствует с приэлектродными областями, где доминирует конвекция, это приводит к смене типа уравнений, что дает ограничение на используемые методы решения.

3) Наличие сильного градиента электрического поля в приэлектродных областях приводит к преобладанию процесса конвекции. Таким образом, возникает проблема аппроксимации производной первого порядка при использовании неявных схем. Аппроксимация центральной разностной производной, может привести к нарушению диагонального преобладания и, следовательно, к неустойчивости вычислений при решении системы алгебраических уравнений. В

случае же использования направленных разностей при аппроксимации уменьшается порядок точности вычислений.

При нахождении решения разностных уравнений по формулам обычной прогонки, для вычисления потока приходится использовать численное дифференцирование. В этом случае происходит значительная потеря точности, поэтому для решения таких задач используется потоковой вариант метода прогонки. Классический метод потоковой прогонки, описанный в учебниках Самарского А.А., применяется к уравнениям, не содержащим диффузионного слагаемого [3, 7]. Позднее стали рассматривать возможность решения методом потоковой прогонкой уравнений с конвективным слагаемым. Например, в работе [1] предложен вариант использования потоковой прогонки при моделировании полупроводниковых приборов для решения задачи переноса электронов.

Рассмотрим возможность применения потоковой прогонки для задачи переноса отрицательных ионов водорода при электролизе, с учетом конвективного слагаемого и непостоянных коэффициентов в межэлектродном пространстве.

Для упрощения записи примем за C значение концентрации ионов водорода (C_{H^+}), за D коэффициент диффузии (D_{H^+}), за u коэффициент подвижности (U_{H^+}), за Ψ обозначим источник ионов водорода $R_1 C_{H_2O}$ и за a обозначим произведение $R_2 OH^-$.

Запишем начально-краевую задачу диффузии – миграции ионов водорода (1) в общем виде с выделением потока

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(G) = \Psi - aC, \quad (4)$$

$$G = -D \frac{\partial C}{\partial x} + uEC, \quad (5)$$

где G – поток ионов водорода.

Значение концентрации водорода на катоде Ψ_1 , и на аноде Ψ_2 находится решением систем задач Коши (2), (3) с помощью явного метода Рунге-Кутта 4-го порядка. И в рассматриваемой нами задаче граничные условия будут интерпретироваться как условия первого рода.

$$C_{H^+}|_{\text{катоде}} = \Psi_1,$$

$$C_{H^+}|_{\text{аноде}} = \Psi_2,$$

Запись задачи баланса заряженных частиц с отдельным выделением потока широко применяются как в газовых разрядах, так и в твердых проводниках [2, 12].

Дискретизацию уравнения (4) и построение разностной схемы будем проводить интегро-интерполяционным способом, применяемым для построения консервативных разностных схем. Для чего заведем систему координат, направив ось Ox перпендикулярно поверхности электрода, катод поместив в точку $x=0$. Тогда анод будет располагаться в точке $x=b$, где b это расстояние между катодом и анодом.

Далее введем на отрезке $[0, b]$ пространственно временную сетку $\omega_h \times \omega_t$, здесь $\omega_h = \{x_0 = 0, x_i = x_{i-1} + h, i = 1, 2, \dots, N - 1, x_N = b\}$ и $\omega_t = \{t_0 = 0, t_j = t_{j-1} + \tau, j = 1, 2, \dots\}$, h это пространственный шаг, τ – временной. Интегро-

интерполяционный метод заключается в интегрировании дифференциального уравнения по непересекающимся областям, окружающий каждый узел сетки и в последующем приближенном вычислении интегралов. Поэтому для решения данной задачи введем $\omega_{h+\frac{1}{2}} = \{x_{1/2}, \dots, x_{i-1/2}, \dots, x_{N-1/2}\}$, здесь $x_{i-1/2}$ – середина отрезка $[x_i - x_{i-1}]$.

При построении неявной разностной схемы значения коэффициентов дифференциальных уравнений будем брать с нижнего временного слоя t_{s-1} . Принтегрировав уравнение (4) по отрезку $[x_{i+h/2} - x_{i-h/2}]$ и полагая $t = t_s$.

$$\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{\partial C}{\partial t} dx + \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{\partial}{\partial x} (G) dx = \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} (\Psi - aC) dx.$$

Интеграл $\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{\partial}{\partial x} (G) dx$ распишем с помощью формулы Ньютона-Лейбница, интегралы $\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{\partial C}{\partial t} dx$ и $\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} (\Psi - aC) dx$ распишем с помощью квадратурной формулы центральных прямоугольников.

$$\left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{x_i} h + G|_{x_{i+1/2}} - G|_{x_{i-1/2}} = (\varphi - aC)|_{x_i} h.$$

Далее воспользуемся формулами численного дифференцирования и получим

$$\frac{u_i - u_i^0}{\tau} + c_i u_i = \frac{w_{i-1/2} - w_{i+1/2}}{h} + f_i.$$

где u_i , ω_i , c_i , f_i – сеточные функции, аппроксимирующие значения решения, потока, свободного члена уравнения и получившихся коэффициентов в i точке.

Поток (5) будем рассматривать на точках сетки $\omega_{h+\frac{1}{2}}$ и миграционное слагаемое аппроксимируем через точки сетки ω_h :

$$G|_{i-1/2} = \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{i-1/2} + \frac{(uEC)|_i + (uEC)|_{i-1}}{2}.$$

Таким образом система (4)-(5) в узлах сетки перепишется в виде

$$\begin{cases} \frac{u_i - u_i^0}{\tau} + c_i u_i = \frac{w_{i-1/2} - w_{i+1/2}}{h} + f_i \\ w_{i-1/2} + d_{i-1/2} u_i = k_{i-1/2} u_{i-1} \end{cases} \quad (6)$$

(7)

Где u_i , ω_i , c_i , f_i , $d_{i-1/2}$, $k_{i-1/2}$ – сеточные аналоги, аппроксимирующие значения решения, потока, свободного члена уравнения и получившихся коэффициентов в i точке.

Предположим наличие связи между искомой функцией u_{i-1} и потоком $w_{i-1/2}$ вида

$$\alpha_i u_{i-1} + \beta_i w_{i-1/2} = \gamma_i \quad (8)$$

и найдем рекуррентное соотношение для вычисления прогоночных коэффициентов $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ и искомых функций $u_{i-1}, w_{i-1/2}$. Для этого из (8) выразим

u_{i-1} и подставим в (7) получим $w_{i-\frac{1}{2}} \left(\alpha_i + k_{i-\frac{1}{2}} \beta_i \right) = k_{i-\frac{1}{2}} \gamma_i - d_{i-1/2} u_i \alpha_i$. Так как коэффициенты $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ определены в (8) с точностью до множителя, введем дополнительное условие $\alpha_i + k_{i-\frac{1}{2}} \beta_i = 1$ и получим

$$w_{i-\frac{1}{2}} = k_{i-\frac{1}{2}} \gamma_i - d_{i-1/2} u_i \alpha_i. \quad (9)$$

Подставим (9) в (6) получим $\left(c_i + \frac{1}{t} \right) u_i + \frac{w_{i+\frac{1}{2}}}{h} - \frac{k_{i-\frac{1}{2}} \gamma_i - d_{i-1/2} u_i \alpha_i}{h} = f_i + \frac{u_i^0}{t}$

и сгруппируем коэффициенты при u_{i-1} получим

$$\left(c_i + \frac{1}{t} + \frac{d_{i-1/2} \alpha_i}{h} \right) u_i + \frac{w_{i+\frac{1}{2}}}{h} = f_i + \frac{u_i^0}{t} - \frac{k_{i-\frac{1}{2}} \gamma_i}{h} \quad (10)$$

Сравнивая получившиеся равенство с равенством (8) и учитывая, что согласно [1] достаточное условия устойчивости вычислительного процесса имеет вид $\left| \frac{d\alpha_{i+1}}{d\alpha_i} \right| < 1$, $\left| \frac{d\beta_{i+1}}{d\beta_i} \right| < 1$, $\left| \frac{d\gamma_{i+1}}{d\gamma_i} \right| < 1$, получим следующие рекуррентные соотношения:

1. если $|d_{i-1/2}| \leq 1$, $|k_{i-1/2}| \leq 1$, то $\alpha_{i+1} = c_i + \frac{1}{t} + \frac{d_{i-1/2} \alpha_i}{h}$,

$$\beta_{i+1} = \frac{1}{h} \gamma_{i+1} = f_i + \frac{u_i^0}{t} - \frac{k_{i-\frac{1}{2}} \gamma_i}{h}$$

2. если $|d_{i-1/2}| \leq 1$, $|k_{i-\frac{1}{2}}| > 1$, то $\alpha_{i+1} = \frac{c_i}{k_{i-\frac{1}{2}}} + \frac{1}{t k_{i-\frac{1}{2}}} + \frac{d_{i-1/2} \alpha_i}{h k_{i-\frac{1}{2}}}$,

$$\beta_{i+1} = \frac{1}{h k_{i-\frac{1}{2}}} \gamma_{i+1} = \frac{f_i}{k_{i-\frac{1}{2}}} + \frac{u_i^0}{k_{i-\frac{1}{2}} t} - \frac{\gamma_i}{h}$$

3. если $|d_{i-1/2}| > 1$, $|k_{i-1/2}| \leq 1$, то $\alpha_{i+1} = \frac{c_i}{d_{i-1/2}} + \frac{1}{t d_{i-1/2}} + \frac{\alpha_i}{h}$,

$$\beta_{i+1} = \frac{1}{h d_{i-1/2}} \gamma_{i+1} = \frac{f_i}{d_{i-1/2}} + \frac{u_i^0}{d_{i-1/2} t} - \frac{k_{i-\frac{1}{2}}}{h}$$

4. если $|d_{i-1/2}| > 1$, $|k_{i-1/2}| > 1$, то

$$\alpha_{i+1} = \frac{c_i}{k_{i-\frac{1}{2}} d_{i-1/2}} + \frac{1}{t k_{i-\frac{1}{2}} d_{i-1/2}} + \frac{\alpha_i}{h k_{i-\frac{1}{2}} d_{i-1/2}}, \beta_{i+1} = \frac{1}{h k_{i-\frac{1}{2}} d_{i-1/2}},$$

$$\gamma_{i+1} = \frac{f_i}{k_{i-\frac{1}{2}} d_{i-1/2}} + \frac{u_i^0}{k_{i-\frac{1}{2}} t d_{i-1/2}} - \frac{\gamma_i}{h d_{i-1/2}}$$

Для нахождения рекуррентного соотношения для потоков выразим u_i из (9) и подставим в (6) получим

1. если $|d_{i-1/2}| \leq 1$, то

$$w_{i-\frac{1}{2}} = \left(-\frac{\gamma_i k_{i-\frac{1}{2}} (1 + c_i)}{d_{i-\frac{1}{2}} t \alpha_i} + f_i + \frac{u_i^0}{t} + \frac{w_{i+\frac{1}{2}}}{h} \right) \left(\frac{h d_{i-1/2} \alpha_i}{(1 + d_{i-\frac{1}{2}} \alpha_i + c_i)} \right)$$

2. если $|d_{i-1/2}| > 1$, то

$$w_{i-\frac{1}{2}} = \left(-\frac{\gamma_i k_{i-\frac{1}{2}} (1 + c_i)}{d_{i-\frac{1}{2}} t \alpha_i} + f_i + \frac{u_i^0}{t} + \frac{w_{i+\frac{1}{2}}}{h} \right) \times \\ \times \left(\frac{h \alpha_i}{\left(\frac{1}{d_{i-\frac{1}{2}}} + \alpha_i + \frac{c_i}{d_{i-\frac{1}{2}}} \right)} \right)$$

Данные рекуррентные формулы устойчивы по отношению к случайной ошибке.

Для вычисления прогоночных коэффициентов $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ воспользуемся граничными условиями в точке $x=0$ в сеточном аналоге, это будет $u_1 = f_1$, сравнив с (5) имеем $\alpha_1 = 1, \beta_1 = 0, \gamma_1 = f_1$.

Для вычисления потока $w_{N-\frac{1}{2}}$ подставим граничное условие $u_N = f_N$ в (8) и выразим $w_{N-\frac{1}{2}}$:

$$w_{N-\frac{1}{2}} = \frac{\gamma_N - \alpha_N f_N}{\beta_N}.$$

За начальные условия в межэлектродном промежутки принимаем состояние системы до подачи электрического тока [6]: концентрация ионов цинка Zn^{2+} в приготовленном растворе составляет 10 г/л. Рабочий электрод был сделан из нержавеющей стали и имеет площадь в 1 cm^2 (далее мы считаем его инертным). Электролит это 20% раствор гидроксида натрия.

Для вычисления констант стадийных приэлектродных процессов был использован метод описанный в работе [6] в тех же предположениях.

На рисунке 1 представлено сравнение экспериментальных данных выхода по массе данных работы [20] и расчетных по представленной модели с помощью метода потоковой прогонки при силе тока в 500 А. Решение модельной задачи по данным работы [6] показало количественное совпадение по выходу цинка и качественное описание распределения характеристик в межэлектродном пространстве, не противоречащее физическому и электрохимическому описанию. При этом учет пространственного вычисления потока тетрагидроксицинката анионов на электрод улучшило схождение результатов по сравнению с работой [6], где решалась «нульмерная» задача на электроде.

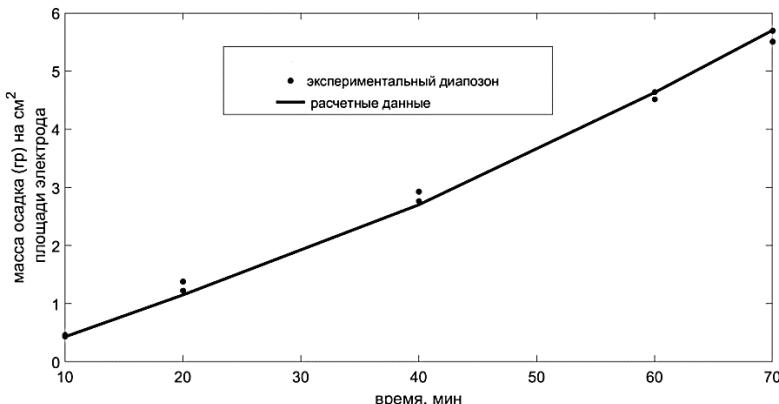


Рисунок 1 – Сравнение выхода цинка при силе тока в 500 А. По оси абсцисс отложено время в мин, по оси ординат приведена масса осадка в граммах на см^2 , точками обозначен диапазон экспериментальных значений

Заключение

В настоящей работе предложена модификация потокового метода прогонки, пригодного для решения задачи переноса заряженных частиц в электролите при наличии конвективного слагаемого и непостоянных коэффициентах. Данный метод позволяет вместе с решением находить значение потока заряженных частиц, что позволяет избежать большой вычислительной погрешности при вычислении потока при численном дифференцировании решения. Рекуррентные формулы вычисления прогоночных коэффициентов, решения и потока устойчивы по отношению к случайной ошибке. Решение модельной задачи, показало не противоречивые с электрохимической точки зрения качественные результаты, наличие градиентов решений в приэлектродных областях, а также связанность ионов в центре межэлектродного промежутка.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Литература

- Гарбер Г.З. Использование потоковой прогонки при квазигидродинамическом моделировании полупроводниковых приборов // Математическое моделирование. 1989. Т. 1. № 10. С. 1-7.
- Гарбер Г.З. Метод расчета параметров малосигнальной эквивалентной схемы сверхвысокочастотных гетероструктурных биполярных транзисторов с варионным эмиттером, основанный на квазигидродинамической модели переноса электронов // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 11. С. 1392-1396.

3. Жуаспаев Т.А. Потоковая прогонка для коэффициентной обратной задачи распространения тепла в материале // Известия ВУЗов (Кыргызстан). 2012. № 5. С. 21-24.
4. Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. Кинетика двухфазных газожидкостных сред в процессах электролиза // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 6. С. 869-876.
5. Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. Математическое моделирование катодных процессов при получении водорода // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 1. С. 99-105.
6. Кашапов Л.Н., Кудрявый А.Д., Чебакова В.Ю., Кормушин К.В. Влияние выделения водорода на процессы осаждения цинка // Информационно-технологический вестник. 2023. № 4(38). С. 143-162.
7. Пирназарова Т.Е. Численное решение трехмерной задачи фильтрации газа в сложных областях методами покомпонентного расщепления и потоковой прогонки // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2017. № 1(7). С. 11-17.
8. Chebakova V. Modeling of hydrogen release during electrolysis of alkaline solution// E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 592. Art. 01010.
9. Chen K., Gu X., Zheng Y. Feasibility, challenges and future prospects of biodegradable zinc alloys as orthopedic internal fixation implants // Smart Materials in Manufacturing. 2024. Vol. 2. Art. 100042.
10. Haran B.S., Popov Br.N., Zheng G., White R.E. Mathematical modeling of hexavalent chromium decontamination from low surface charged soils // Journal of Hazardous Materials. 1997. Vol. 55. P. 93-107.
11. Kashapov L.N., Kashapov N.F., Chebakova V.Yu. Mathematical simulation of cathode processes during hydrogen production // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. Vol. 58. No 3. P. 595-600.
12. Kulikovsky A.A. A more accurate Scharfetter-Gummel algorithm of electron transport for semiconductor and gas discharge simulation // J. Comput. Phys. 1995. Vol. 119. No 1. P. 149-155.
13. Liu A., Qin Y., Dai J., Song F., Tian Y., Zheng Y., Wen P. Fabrication and performance of Zinc-based biodegradable metals: From conventional processes to laser powder bed fusion // Bioactive Materials. 2024. Vol. 41. P. 312-335.
14. Meng M., Wang J., Huang H., Liu X., Zhang J., Li Z. 3D printing metal implants in orthopedic surgery: Methods, applications and future prospects // Journal of Orthopaedic Translation. 2023. Vol. 42. P. 94-112.
15. Mobarak H., Islam A., Hossain N., Mahmud Z., Rayhan Th., Nishi N. J., Chowdhury M. As. Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication – A review // Journal of Alloys and Compounds. 2024. Vol. 992. Art. 174447.
16. Peng Y., Chen M., Wang J., Xie J., Wang Ch., Yang X., Huang X., Gou Zh., Ye J. Tuning zinc content in wollastonite bioceramic endowing outstanding angiogenic and antibacterial functions beneficial for orbital reconstruction // Bioactive Materials. 2024. Vol. 36. P. 551-564.
17. Song P., Song Q., Yang Zh., Zeng G., Xu H., Li X., Xiong W. Numerical simulation and exploration of electrocoagulation process for arsenic and antimony removal

- al: Electric field, flow field, and mass transfer studies // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 228. P. 336-345.
18. Xu L., Fang J., Pan J., Qi H., Yin Y., He Y., Gan X., Li, Li Y., Guo J. Zinc finger-inspired peptide-metal-phenolic nanointerface enhances bone-implant integration under bacterial infection microenvironment through immune modulation and osteogenesis promotion // Bioactive Materials. 2024. Vol. 41. P. 564-576.
19. Zhang Y., Deng J., Chen J., Yu P., Xing X. Leaching of zinc from calcined smithsonite using sodium hydroxide // Hydrometallurgy. 2013. Vol. 131-132. P. 89-92.
20. Zhang Y., Deng J., Chen J., Yu P., Xing X. The Electrowinning of Zinc from Sodium Hydroxide Solutions // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 146. P. 59-63.

УДК 62-2

**Обеспечение высоких динамических и энергетических характеристик
жидкостных ракетных двигателей малой тяги при их работе
в импульсном режиме**

Юрий Иванович Агеенко, доктор технических наук,
профессор кафедры техники и технологии,
заслуженный конструктор Российской Федерации,

Сергей Валерьевич Архипов, ассистент кафедры техники и технологии,
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова» –
филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии»,
г. Королев, Московская область

В статье рассматривается возможность уменьшения времени открытия электромагнитного клапана за счет подачи форсированного напряжения на протяжении 2-4 мс. Проведен расчет-сравнение двух схем подачи командного напряжения.

Жидкостный ракетный двигатель малой тяги (ЖРДМТ), двигательная установка (ДУ), электромагнитный клапан (ЭК), форсированное напряжение.

**Ensuring high dynamic and energy characteristics of low-thrust liquid
rocket engines when operating in pulse mode**

Yuri Ivanovich Ageenko, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Honored Designer of the Russian Federation,

Sergey Valerievich Arkhipov, Assistant of the Department
of Engineering and Technology,
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov» –
Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow State University of Geodesy and Cartography»,
Korolev, Moscow region

The article considers the possibility of reducing the opening time of the solenoid valve by applying a forced voltage for 2-4 ms. A calculation is carried out-a comparison of two command voltage supply circuits.

Low-thrust liquid rocket engine, propulsion system, solenoid valve, forced voltage.

Жидкостный ракетный двигатель малой тяги (ЖРДМТ) выполняет критически важную функцию, являясь непосредственным исполнительным органом

системы управления (СУ) движением космического летательного аппарата (КЛА). Именно благодаря ЖРДМТ аппарат способен осуществлять точные маневры и корректировки орбиты. В полном соответствии со своим специализированным назначением в системе ориентации и стабилизации КЛА, ЖРДМТ эксплуатируется в двух принципиально различных режимах: во-первых, в непрерывном стационарном режиме (подобно своим более крупным аналогам), а во-вторых, и это является его ключевой особенностью, в широком спектре импульсных режимов. Последний характеризуется чрезвычайно большим разнообразием комбинаций кратковременных включений двигателя и пауз между ними. Это коренным образом отличает ЖРДМТ от больших жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), которые предназначены исключительно для работы в продолжительном непрерывном стационарном режиме, например, при выведении на орбиту.

Электромагнитные клапаны (ЭК) широко используются для регулирования потоков жидкостей. В системах управления жидкостными ракетными двигателями они выполняют как роль основных клапанов (например, топливных), так и роль управляющих компонентов, действующих основные клапаны и прочие механизмы. В двигателях ЖРДМТ быстрота срабатывания клапана оказывает значительное влияние на уровень тяги при импульсном режиме работы, а также на величину единичного импульса.

В современных условиях, технические задания (ТЗ) на проектирование и разработку новых ЖРДМТ все чаще содержат весьма жесткие требования. С одной стороны, предъявляется необходимость обеспечения исключительно минимальной продолжительности одного включения двигателя, которая может составлять всего лишь $\tau_c = 0,03$ с или даже менее. С другой стороны, одновременно выдвигаются столь же строгие требования по минимизации энергопотребления электромагнитного клапана. Важно понимать, что данные требования носят противоречивый характер. Это объясняется фундаментальной физической зависимостью: для достижения максимально возможного быстродействия (то есть минимального времени открытия клапана) необходимо прикладывать более высокое командное напряжение к катушке электромагнита, что неизбежно влечет за собой увеличение энергопотребления. Таким образом, конструкторам приходится искать компромиссные решения в рамках этих взаимоисключающих условий.

Для наглядного примера конструкции ЖРДМТ, на рисунке 1 представлена схема известного двигателя R-4D, разработанного в США. Первоначальная разработка этого двигателя была осуществлена корпорацией Marquardt. Впоследствии, на протяжении длительного времени эксплуатации, усовершенствованные версии и модификации двигателей серии R-4D продолжает выпускать компания Aerojet Rocketdyne. Исторически, данный двигатель создавался специально для реактивной системы управления знаменитого космического корабля «Аполлон». С точки зрения технических характеристик, двигатель R-4D развивает тягу в условиях вакуума, достигающую значения в 50 килограмм-сил, а его удельный импульс составляет 312 секунд. В качестве топливной пары, обеспечивающей работу двигателя, используются высокозергетические, но токсичные компоненты: горючее – монометилгидразин (ММГ) и окислитель – тетраоксид диазота (АТ). Конструктивная надежность двигателя позволяет ему рассчитываться на либо суммарную наработку в непрерывном режиме продолжительностью более

одного часа, либо на выполнение до 20 тысяч отдельных циклов срабатывания (включений/выключений). Основное функциональное назначение R-4D заключается в решении задач ориентации КЛА, что, по своей сути, подразумевает его длительную эксплуатацию именно в разнообразных импульсных режимах работы.

Следует отметить, что применение двигателя R-4D не ограничилось только космическим кораблем «Аполлон». Дальнейшая история эксплуатации показала его высокую надежность и востребованность. Модернизированные варианты двигателей R-4D нашли свое применение на многочисленных и разнообразных космических аппаратах. В их число входят, в частности, спутник связи Leasat, эксплуатировавшийся ВМС США, а также международные спутники Insat 1, Intelsat 6, Italsat и BulgariaSat-1. Кроме того, данные двигатели успешно использовались на японском беспилотном транспортном корабле снабжения H-II Transfer Vehicle (HTV) и аналогичном европейском автоматизированном транспортном средстве ATV (Automated Transfer Vehicle). Основной задачей этих кораблей была регулярная доставка необходимых грузов, запасов и топлива на борт Международной космической станции (МКС), где точность маневрирования и ориентации была критически важна.

Рассмотрим последовательность процессов, происходящих при включении двигателя. Инициируется работа ЖРДМТ подачей командного напряжения на катушку электромагнита ЭК (рисунок 2). Это напряжение прикладывается в виде кратковременного электрического импульса длительностью τ_c . Ток, протекающий через обмотку электромагнита, начинает нелинейно нарастать. Данный рост продолжается до тех пор, пока ток не достигнет критической величины, известной как ток трогания (этот момент отмечен как позиция 1 на кривой тока рисунка 3). Достижение тока трогания является необходимым условием для начала физического перемещения подвижной части клапана.

Следующий этап характеризуется началом движения якоря, который механически связан с запорным элементом клапана (якорь-клапан). Интересно отметить, что в процессе этого движения ток в обмотке не продолжает расти, а, напротив, несколько снижается. Это снижение наблюдается вплоть до момента полной посадки якоря на специальный ограничитель хода, выполняющий роль механического стопа (данный элемент обозначен как позиция 3 на конструктивной схеме рисунка 2). Момент, когда клапан достигает своего полностью открытого состояния, фиксируется на диаграмме в позиции 2 на кривой тока рисунка 3. После успешного открытия клапана и посадки якоря на стоп, ток в обмотке вновь начинает возрастать, на этот раз стремясь к своему номинальному установившемуся значению, необходимому для стабильного удержания клапана в открытом положении против сил пружины или давления.

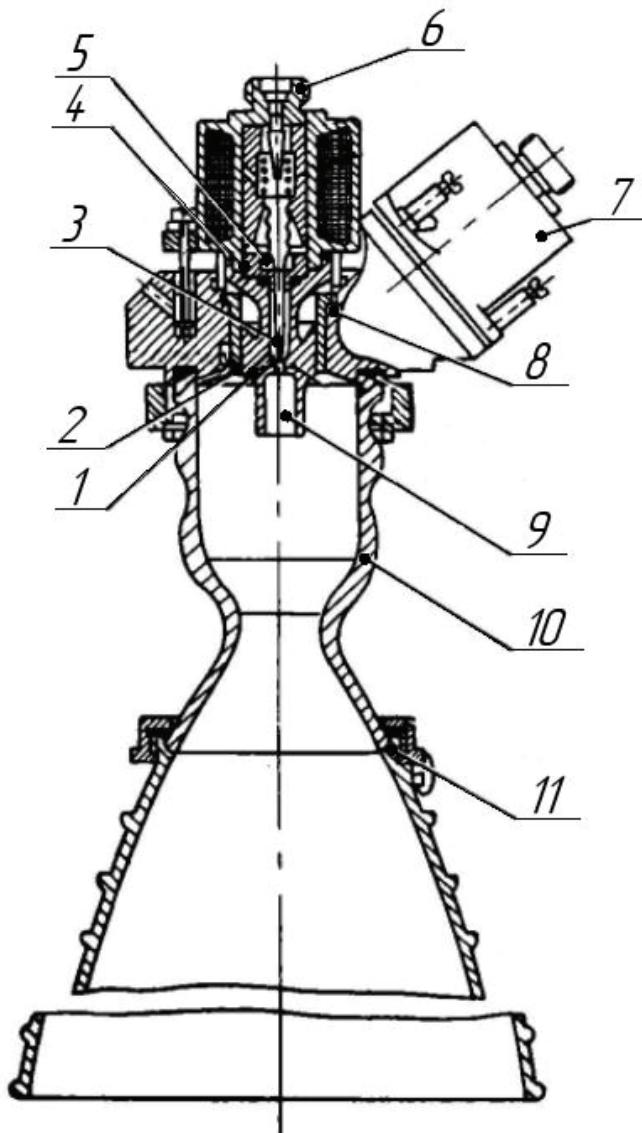


Рисунок 1 – Конструкция двигателя R-4D

1 – форсунки окислителя («О»), 2 – форсунки горючего («Г»), 3 и 8 – заклапанный объём по магистралям «О» и «Г», 4 – якорь, 5 – седло, 6 – электромагнитный клапан «О», 7 – электромагнитный клапан «Г», 9 – предкамера, 10 – камера, 11 – сопло

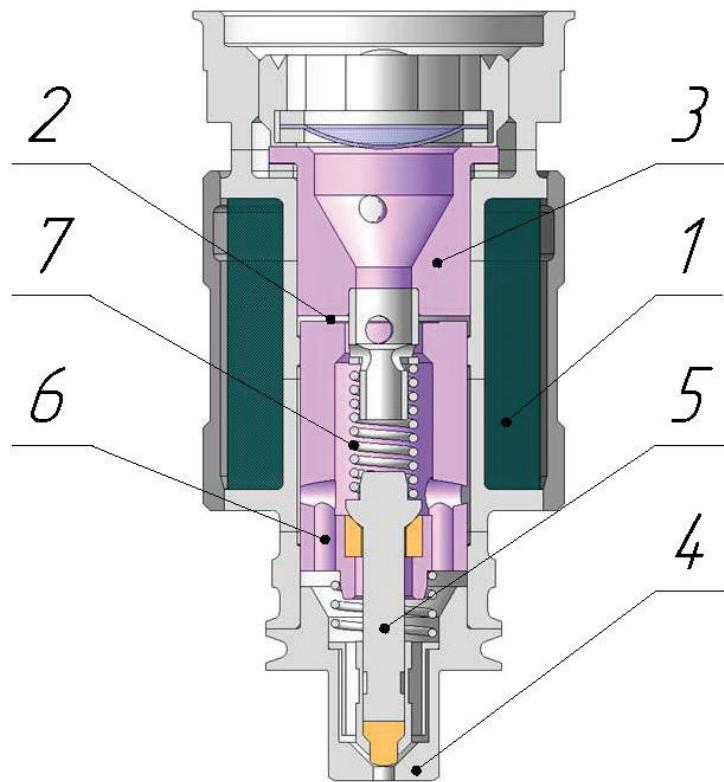


Рисунок 2 – Схема электромагнитного клапана [3]

1 – электромагнит, 2 – ход клапана, 3 – стоп, 4 – седло, 5 – клапан, 6 – якорь, 7 – пружина

Временной интервал, обозначенный на рисунке 3 буквой «А», в точности соответствует периоду непосредственного механического движения якоря-клапана из закрытого положения в полностью открытое. Именно в течение этого критического интервала времени «А» происходят два важнейших параллельных процесса внутри двигателя: во-первых, стремительное заполнение топливом объема магистралей и полостей, расположенных непосредственно за клапаном (так называемого «заклапанного объема»), и, во-вторых, начальная стадия распыления компонентов топлива через форсунки камеры сгорания.

Далее, после полного открытия клапана и заполнения тракта, начинается этап формирования рабочего давления в камере сгорания (КС). Давление в камере сгорания (P_k) также нарастает не мгновенно. Первоначально P_k увеличивается до уровня, равного давлению упругости насыщенных паров используемых компонентов топлива (этот переходный уровень указан как позиция 5 на кривой P_k рисунка 3). Преодоление этого порога означает начало интенсивного фазового перехода топлива и старта устойчивого процесса горения. Как следствие, после достижения давления упругости паров, P_k в камере сгорания резко, почти скачкообразно, нарастает до своего расчетного установленного значения, соответствующего номинальной тяге двигателя. Принципиально важно, что динамика изменения давления в камере сгорания (P_k) имеет прямую и однозначную анало-

гию с динамикой изменения развиваемой двигателем тяги (R) ЖРДМТ. Другими словами, кривая $R_k(t)$ является хорошим индикатором кривой $R(t)$.

Теперь рассмотрим процесс выключения двигателя. В момент прекращения подачи командного напряжения на клапан возникает сложная электромагнитная переходная процесса. Прежде всего, при разрыве цепи питания катушки в ее обмотке индуцируется значительная противо-электродвижущая сила (противо-Э.д.с.), которая является физической причиной появления характерной задержки отпускания клапана, обозначаемой как $\tau_{отп}$. Влияние этой противо-Э.д.с. проявляется в том, что ток, протекающий через обмотку электромагнита, не может исчезнуть мгновенно, как того требует идеальный сценарий. Вместо этого ток начинает плавно спадать. Фактическое начало движения якоря-клапана в обратном направлении (закрытие) становится возможным лишь тогда, когда спадающий ток достигает достаточно малой величины, при которой электромагнитное усилие, создаваемое катушкой, уже становится недостаточным для преодоления сил, стремящихся закрыть клапан (сил пружины и/или давления топлива на тарелку).

Собственно процесс закрытия клапана происходит в течение временного интервала, обозначенного на рисунке 3 буквой «Б». На протяжении этого интервала якорь-клапан осуществляет свое движение из полностью открытого положения обратно в положение полного закрытия (см. рисунок 3, позиция 3 – начало движения закрытия, и позиция 4 – момент полного закрытия). Это движение, обусловленное механическими и гидравлическими факторами, приводит к перекрытию потока топлива и последующему затуханию процесса горения в камере.

Так как в ТЗ требование $\tau_c = 0,03$ с (и менее), то требуется обеспечить время открытия ЭК $\tau_{cp} = 5 - 8$ мс и даже меньше. Однако обеспечить уменьшение τ_{cp} «механикой» (конструкцией ЭК) практически невозможно из-за наличия движущихся элементов, трения и т.д.

Одним из способов улучшения динамических характеристик ЭК является использование электромагнитных свойств – подаче кратковременного форсированного напряжения. За счёт этого значение тока трогания настанет быстрее, из чего следует, что и открытие клапана произойдёт раньше. При более раннем открытии клапана увеличится и время, которое клапан будет находиться в открытом состоянии, что приведет к увеличению величины импульса тяги (J) и удельного импульса тяги ($J_{уд}$). На основе исследований [4] оптимальным значением форсированного напряжения является ≈ 60 В.

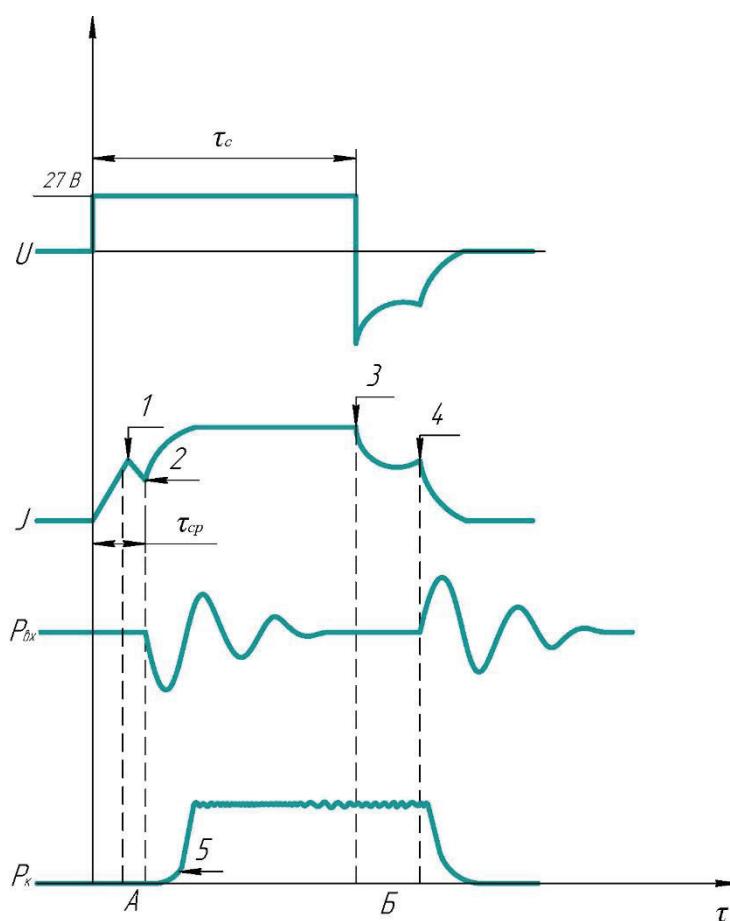


Рисунок 3 – Временные диаграммы изменения параметров ЖРДМТ по времени
(Обычная схема)

За счёт того, что на клапан подается большее значение напряжения увеличивается и его энергопотребление, что противоречит требованиям ТЗ. Чтобы уменьшить энергопотребление ЭК предлагается после подачи форсированного напряжения в течение 3-5 мс переходить на напряжение удержания [5] (минимальное значение, при котором клапан остается в открытом состоянии) 12-14 В (вместо номинального напряжения 27 В). Данная схема представлена на рисунке 4.

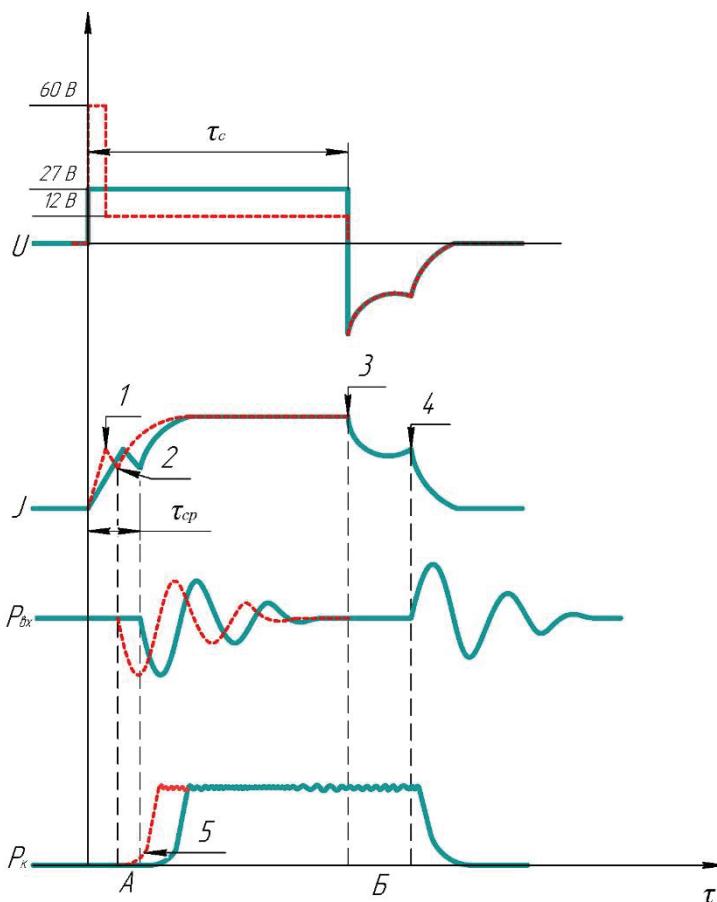


Рисунок 4 – Временные диаграммы изменения параметров ЖРДМТ по времени
(Схема с форсированным напряжением)

Ключевые временные параметры, количественно характеризующие неизбежные запаздывания в процессе срабатывания электромагнитного привода клапана, подлежат точному определению. Основным методом для их установления служит тщательный анализ совокупности временных графиков (осциллограмм), фиксирующих изменение двух принципиально важных электрических величин: подаваемого командного напряжения и ответного тока, протекающего в обмотке электромагнитного привода двигателя.

Рассмотрим природу этих сигналов. Импульс командного напряжения, нанесенный на временную диаграмму, в подавляющем большинстве случаев представляет собой непосредственное отражение управляющего электрического сигнала, сформированного и выданного вышестоящей СУ КЛА. Этот импульс является исходным, инициирующим воздействием на цепь управления клапаном. Напротив, характерная кривая изменения тока в обмотке электромагнита несет в себе гораздо более сложную информацию и находится в прямой и нелинейной зависимости не только от приложенного напряжения, но и от физического состояния самого электромеханического устройства. Конкретно, форма и динамика

этой токовой кривой теснейшим образом связаны с изменяющейся величиной рабочего воздушного зазора в магнитопроводе электромагнита. А поскольку этот рабочий зазор непосредственно определяется линейным перемещением (ходом) якоря, механически соединенного с запорным элементом клапана, то анализ кривой тока становится ценным косвенным инструментом для оценки кинематики процесса движения – его начала, скорости и завершения – как самого якоря, так и управляемых им клапанов двигателя.

Однако, несмотря на важность электрических характеристик привода, ключевой с точки зрения динамики работы двигателя и конечной эффективности системы управления аппаратом является иная, непосредственно рабочая зависимость. Наибольший практический интерес для оценки инерционности и быстродействия системы в целом представляет динамическая зависимость развиваемой двигателем тяги (R) или, что является ее прямым аналогом и часто более удобным для измерений параметром, изменения давления в камере сгорания (P_k) от времени. Именно эта зависимость ($R(t)$ или $P_k(t)$) интегрально отражает реальное запаздывание между командой на включение/выключение и фактическим появлением/исчезновением управляющей силы тяги, оказываемой двигателем на космический аппарат. В соответствии с переходной характеристикой апериодического звена первого порядка изменения тяги по времени в реальном импульсе на участках пуска и останова двигателя с достаточной для практики точностью можно описать с помощью следующих выражений [2]:

$$R_{\text{пуск}} = R_{\text{ном}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_1}} \right) \quad (1)$$

$$R_{\text{ост}} = R_{\text{ном}} e^{-\frac{\tau}{T_2}}, \quad (2)$$

где:

τ – текущее время нарастания (спада) тяги с момента начала изменения тяги, с;

T_1 – постоянная времени двигателя при пуске, с;

T_2 – постоянная времени двигателя при останове, с;

$R_{\text{пуск}}$ и $R_{\text{ост}}$ – в Н.

Величины T_1 и T_2 определяются проекциями касательных к кривой изменения тяги на линию установившегося значения тяги $R_{\text{ном}}$. (см. рисунок 3)

$$i = i_0 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_k}} \right), \quad (3)$$

где:

$i_0 = \frac{u_0}{R_0}$ – установившееся значение силы тока в цепи катушки электромагнита, А;

u_0 – установившееся значение напряжения питания, В;

R_0 – номинальное сопротивление обмотки катушки электромагнита, Ом;

$T_k = \frac{L_0}{R_0}$ – постоянная катушки электромагнита, с;

L_0 – начальное значение индуктивности катушки электромагнита, Гн.

Движение якоря начинается при определенной величине тока срабатывания $i = i_1$, которую можно найти из выражения:

$$F_3 = -\frac{i^2}{2} * \frac{dL}{d\sigma}, \quad (4)$$

где:

F_3 – усилие электромагнита, Н;

L – индуктивность катушки, определяемая из выражения

$$L = \frac{\mu_0 S_a \omega^2}{\sigma}, \quad (5)$$

где:

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;

S_a – площадь якоря электромагнита, м²;

ω – число витков катушки электромагнита;

σ – текущий зазор между якорем и ограничителем хода электромагнита,

м.

Дифференцируя последнее выражение и подставляя полученный результат в уравнение для F_3 , получим:

$$F_3 = \frac{i^2}{2} * \frac{L}{\sigma} \quad (6)$$

В момент трогания якоря

$$i = i_1, L = L_0, \sigma = \sigma_0, F_3 = F_0 + \frac{\pi d_{kl}^2}{4} * p_0,$$

где F_0 – начальное усилие возвратной пружины клапана, Н.

Из последнего выражения после подстановки параметров находим

$$i_1 = \sqrt{\frac{2 * \sigma_0}{L_0} \left(F_0 + \frac{\pi d_{kl}^2}{4} * p_0 \right)}. \quad (7)$$

Подставляя полученное выражение в уравнение изменения силы тока в электромагнитном приводе, после преобразований определяем:

$$\tau_{cp} = \frac{L_0}{R_0} \ln \frac{1}{1 - \frac{R_0}{u_0} \sqrt{\frac{2 * \sigma_0}{L_0} \left(F_0 + \frac{\pi d_{kl}^2}{4} * p_0 \right)}}. \quad (8)$$

Вычисления для ЭК ЖРДМТ тягой 25 Н показали, что при подаче напряжения 27 В $\tau_{cp} = 0,0078$ с, а при подаче форсированного напряжения 60 В $\tau_{cp} = 0,0034$ с, т.е. время срабатывания ЭК уменьшается более чем в 2 раза, и увеличивается время нахождения ЭК в открытом состоянии (см. точки 2 и 4 рисунка 4).

Стоит отметить, что увеличение значения напряжения ведет за собой увеличения энергопотребления ЭК. Однако, за счёт перехода с форсированного напряжение на напряжение удержание (которое меньше, чем «номинальное» напряжение 27 В), мы получаем повышение энергоэффективности ЭК: для $\tau_c = 0,03$ с при обычной схеме энергопотребление составляет 6,6 Вт, а при схеме с форсированным напряжением 60 В и переходом на напряжение удержания 12 В – 3,18 Вт.

Единичный импульс тяги в коротких включениях:

$$I_{ed} = \int_0^{\tau_{imp}} R dt \quad (9)$$

Удельный импульс тяги в коротких включениях:

$$J_{уд.имп} = \frac{\int_0^{\tau_{имп}} R d\tau}{\int_0^{\tau_{имп}} G d\tau} \quad (10)$$

Известно, что чем меньше время включения τ_c , тем меньше величина импульса тяги (J) и удельного импульса тяги ($J_{уд}$).

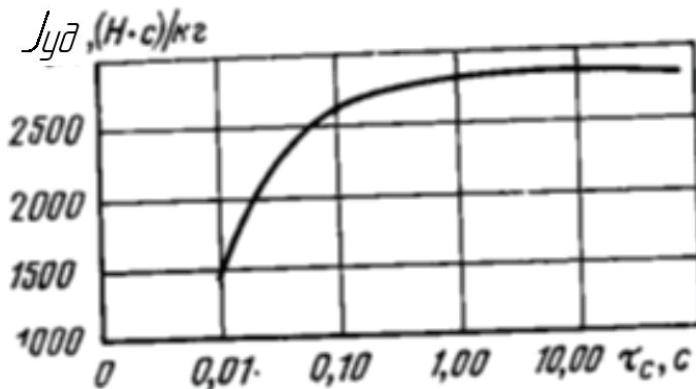


Рисунок 5 – Зависимость удельного импульса тяги от длительности командного электрического сигнала для двигателя Р-4Д [2]

Из рисунка видно, что при длительности сигнала $\tau_c=1,0$ с и более удельный импульс тяги двигателя в импульсном и непрерывном режимах работы практически одинаковы. Аналогичная зависимость удельного импульса от длительности командного сигнала схожа для всех других двухкомпонентных ЖРДМТ. Из этого следует, что с увеличением времени нахождения ЭК в открытом состоянии увеличивается J и $J_{уд}$ (см. рис. 4 и таблицу 1).

Из рисунка 4 видно, что за счёт увеличения времени открытого состояния ЭК, то есть большего количества топлива, поступающего в камеру сгорания увеличивается величина импульса тяги при самом коротком включении с $\tau_{c min} = 0,03$ с на $\approx 10\%$, и вместе с ним увеличивается значение удельного импульса.

Таблица 1 – сравнение двух схем подачи форсированного напряжения

Параметр	Обычная схема	Схема с форсированным напряжением	Разница
Время открытия клапана, с	0,0078	0,0034	-56,4%
Энергопотребление, Вт	6,6	3,18	-51,8%

Выводы

При форсированной подаче командного напряжения ≈ 60 В в течение ≈ 4 мс с последующим переходом на напряжение удержания ≈ 12 В при $\tau_{c min} = 0,03$ с:

1. Время открытия ЭК уменьшается с 0,0078 с на 0,0034 с.
2. Уменьшается интегральное энергопотребление ЭК за 1 включение на $\approx 51,8\%$.

3. Увеличивается удельный импульс на самом коротком включении $\tau_{c\ min} = 0,03 с на $\approx 10\%$.$

4. Немного усложнился генератор подачи командных импульсов.

5. Преимущества использования данной схемы выше, чем её недостатков. Выигрыш существенный, так как и по ТЗ, и в реальной жизни количество включений одного ЖРДМТ может быть 100000 и больше.

Литература

1. Байбузов А.В., Букашев Ф.И. Принципы проектирования электромагнитных клапанов с форсированным электромагнитом // Вестник НовГУ. 2009. № 50 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-proektirovaniya-elektromagnitnyh-klapanov-s-forsirovannym-elektromagnitom> (дата обращения: 04.04.2025).
2. Беляев Н.М., Уваров Е.И. Расчет и проектирование реактивных систем управления космических летательных аппаратов: учебное пособие. М: «Машиностроение», 1974. 200 с.
3. Козлов А.А., Воробьев А.Г., Боровик И.Н. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги: учебное пособие. М: МАИ, 2013. 208 с.
4. Different boost voltage effects on the dynamic response and energy losses of high-speed solenoid valves [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fuel-bmstu.ru/wp-content/uploads/2018/05/Different-boost-voltage-effects-on-the-dynamic-response-and-energy.pdf> (дата обращения: 04.04.2025).
5. Energy-saving and Performanceenhancing of a High Speed on/off Solenoid Valve // ResearchGate [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/361241301_Energy-saving_and_performance-enhancing_of_a_high_speed_onoff_solenoid_valve (дата обращения: 04.04.2025).

УДК 514.862

Улучшение варианта Тзяо геометрически нелинейной теории тонких оболочек

Евгений Алексеевич Кротов, кандидат технических наук,

доцент кафедры математики,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет», г. Санкт-Петербург

Рассмотрен и проанализирован общий квадратичный вариант С.Х. Тзяо геометрически нелинейной теории тонких оболочек, несколько изменяющий известный классический вариант В.В. Новожилова. Показано наличие в варианте С.Х. Тзяо членов, имеющих порядок выше заявленного и не упрощающих решение. Вариант исправлен в смысле оставления всех теоретически однопорядковых членов и записан в традиционных терминах линейной теории тонких оболочек.

Геометрически нелинейная теория тонких оболочек, общий квадратичный вариант геометрически нелинейной теории тонких оболочек, вариант С.Х. Тзяо, вариант В.В. Новожилова, теоретически однопорядковые члены.

Improvement of the Tsao version of the geometrically nonlinear theory of thin shells

Evgeniy Alexeevich Krotov, Candidate of Engineering Sciences,

Docent at the Department of Mathematics,

Saint-Petersburg State Marine Technical University (SMTU), Saint-Petersburg

The general quadratic version of C.H. Tsao of the geometrically nonlinear theory of thin shells, somewhat changing the well-known classical version of V.V. Novozhilov, was considered and analyzed. The presence of terms in the C.H. Tsao version that have an order higher than the declared one and do not simplify the solution is shown. The variant is corrected in the sense of leaving all theoretically one-order terms and written in traditional terms of the linear theory of thin shells.

Geometrically nonlinear thin shell theory, general quadratic variant of geometrically nonlinear thin shell theory, V.V. Novozhilov variant, C.H. Tsao variant, theoretically single-order terms.

В [1, С. 238] С.Х. Тзяо представил общий квадратичный вариант геометрически нелинейной теории тонких оболочек, несколько изменяющий известный вариант В.В. Новожилова [2, С. 184]. В настоящей статье показывается, что и сам вариант Тзяо может быть улучшен.

Тзяо предлагает в соответствии с приведенным им выводом следующие формулы геометрических соотношений:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} = & Z_1 \left(e_{11}^{\circ} + \frac{1}{2} Z_1 (e_{11}^{\circ 2} + e_{12}^{\circ 2} + e_{13}^{\circ 2}) \right) + \\ & + z Z_1 \left(k_{11} + Z_1 (e_{11}^{\circ} k_{11} + e_{12}^{\circ} k_{12} + \underline{e_{13}^{\circ} k_{13}}) \right), (1 \leftrightarrow 2)\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{12} = & Z_1 e_{12}^{\circ} + Z_2 e_{21}^{\circ} + Z_1 Z_2 (e_{11}^{\circ} e_{21}^{\circ} + e_{22}^{\circ} e_{12}^{\circ} + e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ}) + \\ & + z [Z_1 k_{12} + Z_2 k_{21} + Z_1 Z_2 (e_{11}^{\circ} k_{21} + e_{21}^{\circ} k_{11} + \\ & + e_{22}^{\circ} k_{12} + e_{12}^{\circ} k_{22} + \underline{e_{13}^{\circ} k_{23}} + \underline{e_{23}^{\circ} k_{13}})],\end{aligned}$$

где $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}$ – компоненты деформации оболочки,

e_{ij}^0 и k_{ij} – компоненты тангенциальной и изгибной деформации соответственно ($i = 1, 2$; $j = 1, 2, 3$),

$$Z_i = \frac{1}{1 + \frac{z}{R_i}}, i = 1, 2, \quad (2)$$

где z – расстояние по нормали от рассматриваемой точки оболочки до ее срединной поверхности,

$R_i, i = 1, 2$ – главные радиусы кривизны срединной поверхности.

При выводе (1) использовалась гипотеза Кирхгофа-Лява и пренебрегали членами $\sim z^2$

$$Z_i = \frac{1}{1 + \frac{z}{R_i}} = 1 - \frac{z}{R_i} \quad (3)$$

Покажем, что подчеркнутых в (1) членов быть не должно.

Подставив в формулу (1) значение k_{ij} согласно [2, С. 184], получаем:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} = & Z_1 \left(e_{11}^{\circ} + \frac{1}{2} Z_1 (e_{11}^{\circ 2} + e_{12}^{\circ 2} + e_{13}^{\circ 2}) \right) + \\ & + z \left[k_{11} + Z_1 \left(\begin{aligned} & e_{11}^{\circ} \left(\frac{1}{A_1} \frac{\partial \theta}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \psi + \frac{\chi}{R_1} \right) + \\ & + e_{12}^{\circ} \left(\frac{1}{A_1} \frac{\partial \psi}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \theta \right) + \\ & + e_{13}^{\circ} \left(\frac{1}{A_1} \frac{\partial \chi}{\partial \alpha_1} - \frac{\theta}{R_1} \right) \end{aligned} \right) \right], (1 \leftrightarrow 2)\end{aligned}\quad (4)$$

где α_1, α_2 – линии главных кривизн,

A_1, A_2 – параметры Ламе,

θ, ψ, χ – углы поворотов нормали в точке срединной поверхности оболочки.

В (4) и далее подчеркиваем одной чертой члены, соответствующие подчеркнутому одной чертой в (1).

В соответствии с [1, С. 238] в отличие от [2, С. 182] выражения для θ, χ и ψ имеют вид:

$$\begin{aligned}\theta = & -e_{13}^{\circ} + e_{11}^{\circ} e_{13}^{\circ} + e_{12}^{\circ} e_{23}^{\circ}, \\ \psi = & -e_{23}^{\circ} + e_{22}^{\circ} e_{23}^{\circ} + e_{13}^{\circ} e_{21}^{\circ} \\ \chi = & -\frac{1}{2} (e_{13}^{\circ 2} + e_{23}^{\circ 2})\end{aligned}\quad (5)$$

Подставляем (5) в (4), пренебрегаем слагаемыми, содержащими e_{ij}^{03} по сравнению с e_{ij}^0 и e_{ij}^{02} , и приводим подобные слагаемые:

$$\varepsilon_{11} = Z_1 \left\{ \begin{array}{l} e_{11}^0 + \frac{1}{2} Z_1 (e_{11}^{02} + e_{12}^{02} + e_{13}^{02}) + \\ - \frac{1}{A_1} \frac{\partial e_{13}^0}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} e_{23}^0 + \\ + \frac{1}{A_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} (e_{11}^0 e_{13}^0) - \\ - \frac{Z_1}{A_1} \frac{\partial e_{13}^0}{\partial \alpha_1} e_{11}^0 + \frac{1}{A_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} (e_{12}^0 e_{23}^0) - \\ - \frac{Z_1}{A_1} e_{12}^0 \frac{\partial e_{23}^0}{\partial \alpha_1} + \\ + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} (e_{22}^0 e_{23}^0 - Z_1 e_{11}^0 e_{23}^0) + \\ + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} (e_{13}^0 e_{23}^0 + Z_1 e_{12}^0 e_{13}^0) - \\ - \frac{1}{2R_1} e_{13}^{02} - \frac{1}{2R_1} e_{23}^{02} + \frac{Z_1}{R_1} e_{13}^{02} \end{array} \right\}, (1 \leftrightarrow 2) \quad (6)$$

Сгруппируем в (6) члены, пропорциональные e_{13}^{02} , и пренебрежем, как и ранее, членами $\sim z^2$:

$$\begin{aligned} & Z_1 \left(\frac{1}{2} Z_1 e_{13}^{02} + \frac{z Z_1}{R_1} e_{13}^{02} - \frac{z}{2R_1} e_{13}^{02} \right) = \\ & = Z_1^2 e_{13}^{02} \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{R_1} - \frac{1}{2} \frac{z}{R_1} \left(1 + \frac{z}{R_1} \right) \right) = Z_1^2 e_{13}^{02} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{z}{R_1} \right) = \\ & = Z_1^2 e_{13}^{02} \frac{1}{2Z_1} = \frac{1}{2} Z_1 e_{13}^{02}, (1 \leftrightarrow 2) \end{aligned} \quad (7)$$

Подчеркнутый в (6) член исчез.

Подставляя (7) в (6) и учитывая (3), получаем:

$$\varepsilon_{12} = e_{11}^0 + \frac{1}{2} (e_{11}^{02} + e_{12}^{02} + e_{13}^{02}) +$$

$$+ z \left\{ \begin{array}{l} - \frac{1}{A_1} \frac{\partial e_{13}^0}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} e_{23}^0 - \frac{1}{2R_1} e_{23}^{02} + \\ + \frac{1}{A_1} \frac{\partial e_{11}^0}{\partial \alpha_1} e_{13}^0 + \frac{1}{A_1} \frac{\partial e_{12}^0}{\partial \alpha_1} e_{23}^0 + \\ + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} e_{23}^0 (e_{22}^0 - e_{11}^0) + \\ + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} e_{13}^0 (e_{21}^0 - e_{12}^0) - \frac{e_{11}^0}{R_1} - \\ - \frac{1}{2R_1} (e_{13}^0 + 2e_{11}^{02} + 2e_{12}^{02}) \end{array} \right\}, (1 \leftrightarrow 2) \quad (8)$$

Аналогично, подставляя в третью формулу (1) выражения для k_{ij} , учитывая (5) и пренебрегая членами $\sim e_{ij}^{03}$ и выше, получаем:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{12} = & Z_1 e_{12}^{\circ} + Z_2 e_{21}^{\circ} + Z_1 Z_2 (e_{11}^{\circ} e_{21}^{\circ} + e_{22}^{\circ} e_{12}^{\circ} + e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ}) + \\
 & \left[-\frac{Z_1}{A_1} \frac{\partial e_{23}^{\circ}}{\partial \alpha_1} + \frac{Z_1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} e_{13}^{\circ} + \frac{Z_1}{A_1} \frac{\partial (e_{22}^{\circ} e_{23}^{\circ})}{\partial \alpha_1} - \frac{Z_1 Z_2}{A_1} \frac{\partial e_{23}^{\circ}}{\partial \alpha_1} e_{22}^{\circ} + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{Z_1}{A_1} \left(\frac{\partial (e_{21}^{\circ} e_{13}^{\circ})}{\partial \alpha_1} - Z_2 \frac{\partial e_{13}^{\circ}}{\partial \alpha_1} e_{21}^{\circ} \right) + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{Z_1}{A_1 A_2} \left(\frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} (-e_{11}^{\circ} e_{13}^{\circ}) + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + Z_2 \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} e_{11}^{\circ} e_{23}^{\circ} \right) + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{Z_1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} (-e_{12}^{\circ} e_{23}^{\circ} + Z_2 e_{21}^{\circ} e_{23}^{\circ}) + \right. \\
 & \quad \left. + Z_2 \left(-\frac{1}{A_2} \frac{de_{13}^{\circ}}{d\alpha_2} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} e_{23}^{\circ} \right) + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{Z_2}{A_2} \left(\frac{\partial (e_{11}^{\circ} e_{13}^{\circ})}{\partial \alpha_2} - Z_1 \frac{\partial e_{13}^{\circ}}{\partial \alpha_2} e_{11}^{\circ} \right) + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{Z_2}{A_2} \left(\frac{\partial (e_{12}^{\circ} e_{23}^{\circ})}{\partial \alpha_2} - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - Z_1 \frac{\partial e_{23}^{\circ}}{\partial \alpha_2} e_{12}^{\circ} \right) + \frac{Z_2}{A_1 A_2} \left(\frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} (-e_{22}^{\circ} e_{23}^{\circ}) + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} Z_1 (e_{22}^{\circ} e_{13}^{\circ}) \right) + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{Z_2}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} (-e_{13}^{\circ} e_{21}^{\circ} - Z_1 e_{12}^{\circ} e_{13}^{\circ}) + \right. \\
 & \quad \left. + Z_1 Z_2 e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right] \\
 + z & \quad (9)
 \end{aligned}$$

Сгруппируем в (9) члены, пропорциональные $e_{12}^{\circ} e_{23}^{\circ}$, отбросим слагаемые, содержащие z^2 , и учтем (3).

$$\begin{aligned}
 z Z_1 Z_2 e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + Z_1 Z_2 e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ} = \\
 = Z_1 Z_2 e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ} \left(1 + \frac{z}{R_1} + \frac{z}{R_2} \right) = \\
 = e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ} \left(1 - \frac{z}{R_1} \right) \left(1 - \frac{z}{R_2} \right) \left(1 + \frac{z}{R_1} + \frac{z}{R_2} \right) = \\
 = e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ} \left(1 - \frac{z}{R_1} - \frac{z}{R_2} \right) \left(1 + \frac{z}{R_1} + \frac{z}{R_2} \right) = \\
 = e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ} \left(1 - \left(\frac{z}{R_1} + \frac{z}{R_2} \right)^2 \right) = e_{13}^{\circ} e_{23}^{\circ}
 \end{aligned} \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) с учетом (7), получаем:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{12} = & e_{12}^o + e_{21}^o + e_{11}^o e_{21}^o + e_{22}^o e_{12}^o + e_{13}^o e_{23}^o + \\
 & - \frac{\partial e_{23}^o}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} e_{13}^o - \frac{\partial e_{13}^o}{\partial \alpha_2} + \\
 & + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} e_{23}^o - \\
 & - \frac{e_{12}^o}{R_1} - \frac{e_{21}^o}{R_2} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) (e_{11}^o e_{21}^o + e_{22}^o e_{12}^o + e_{13}^o e_{23}^o) + \\
 & + (e_{12}^o + e_{21}^o) \frac{1}{A_1 A_2} \left(\frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} e_{23}^o + \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} e_{13}^o \right) \\
 & + (e_{22}^o + e_{11}^o) \frac{1}{A_1 A_2} \left(\frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} e_{23}^o - \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} e_{13}^o \right) \\
 & - \frac{1}{A_1} \frac{\partial e_{22}^o}{\partial \alpha_1} e_{23}^o - \frac{1}{A_1} \frac{\partial e_{21}^o}{\partial \alpha_1} e_{13}^o - \frac{1}{A_2} \frac{\partial e_{11}^o}{\partial \alpha_2} e_{13}^o - \frac{1}{A_2} \frac{\partial e_{12}^o}{\partial \alpha_2} e_{23}^o
 \end{aligned} \quad (11)$$

Формулы (8) и (11) дают улучшение варианта Тзяо, так как сохраняют все теоретически однопорядковые члены и отбрасывают все члены более высокого порядка. Они отличаются от (1) отсутствием члена $e_{13}^o k_{13}$ и изменением коэффициента $\frac{1}{R_1}$ на $\frac{1}{2R_1}$ при e_{13}^o в ε_{11} и отсутствием членов $e_{13}^o k_{23}$ и $e_{23}^o k_{13}$ в ε_{12} .

В заключение по традиции запишем улучшенный вариант в терминах линейной теории тонких оболочек:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{11} &= E_1 + zK_1, (1 \rightleftharpoons 2) \\
 \varepsilon_{12} &= \Omega + 2zT,
 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \varepsilon_1 + \frac{1}{2}(\varepsilon_1^2 + \theta_1^2 + \omega_1^2), (1 \rightleftharpoons 2) \\
 K_1 &= \alpha_1 - \frac{\varepsilon_1}{R_1} - \frac{1}{2R_1}(2\varepsilon_1^2 + 2\omega_1^2 + \theta_1^2 + \theta_2^2) - \\
 &\quad - \frac{1}{A_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \alpha_1} \theta_1 - \frac{1}{A_1} \frac{\partial \omega_1}{\partial \alpha_2} \theta_2 - \\
 &\quad - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} (\theta_1(\omega_1 + \omega_2) + \theta_2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)), (1 \rightleftharpoons 2) \\
 \Omega &= \omega_1 + \omega_2 + \varepsilon_1 \omega_2 + \varepsilon_2 \omega_1 + \theta_1 \theta_2, \\
 2T &= \tau_1 + \tau_2 - \frac{\omega_1}{R_1} - \frac{\omega_2}{R_2} + \\
 &\quad + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) (\varepsilon_1 \omega_2 + \varepsilon_2 \omega_1 + \theta_1 \theta_2) + \\
 &\quad + (\omega_1 + \omega_2) \frac{1}{A_1 A_2} \left(\frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \theta_2 + \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \theta_1 \right) + \\
 &\quad + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \frac{1}{A_1 A_2} \left(\frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \theta_2 - \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \theta_1 \right) - \\
 &\quad - \frac{1}{A_1} \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial \alpha_1} \theta_2 - \frac{1}{A_2} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \alpha_2} \theta_1 - \frac{1}{A_1} \frac{\partial \omega_2}{\partial \alpha_1} \theta_1 - \frac{1}{A_2} \frac{\partial \omega_1}{\partial \alpha_2} \theta_2
 \end{aligned} \tag{12}$$

Литература

1. Tsao C.H. Strain-displacement relations in large displacement theory of shells // AIAA J. 1964. Vol.2. № 11. P.236-238.
2. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. М. Л.: Гостехиздат, 1948. 211 с.

УДК 528.8

Подходы к планированию съемок космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли

Антон Константинович Чернов, инженер,

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва
(ПАО «РКК «Энергия»), г. Королев, Московская область

В работе рассматриваются подходы к планированию съемок поверхности Земли космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования. В задаче планирования выделяются три основных составляющих: определение основных параметров задачи съемки, определение модели космической системы (КС) и выбор алгоритма решения задачи. Дальше, в работе последовательно рассматриваются существующие подходы к решению каждой из подзадач, выделяя их основные особенности, а также фокусируясь на перспективных направлениях для исследования.

Космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, автоматизированное планирование съемок, космическая система, модель, алгоритм.

Approaches to Earth observation satellites mission planning

Anton Konstantinovich Chernov, engineer,

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia),
Korolev, Moscow region

Different approaches to Earth observation satellites mission planning are presented in this article. Three main components of the task of the Earth observation are highlighted: task details, model building and algorithm solution. The existing approaches to solving each of the subtasks are consistently considered in this article. Main features of this approaches are highlighted. In conclusion, future research focus in this field have been suggested.

Spacecraft, Earth observation, survey planning, space system, model, algorithm.

Введение

С развитием новых технологий происходит увеличение числа запущенных КА и орбитальных группировок (ОГ) различного назначения, в том числе и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Это, в свою очередь, приводит к существенному увеличению объемов поступающей информации, усложняется задача обработки и отбраковки полученных данных ДЗЗ. В таких условиях чрезвычайно важной становится задача обеспечения рационального функционирования КС.

Для увеличения производительности и эффективности КС при одновременном снижении трудоемкости, требуемой для ее управления, разрабатываются

системы автоматизированного планирования съемок КА Д33.

В настоящей работе проведен обзор научных трудов за последние 20 лет с использованием ресурсов поисковых систем elibrary и ResearchGate по вышеуказанным ключевым словам.

Целью работы является обобщение имеющихся литературных данных по моделям и алгоритмам, использующимся в задаче автоматизированного планирования съемок КА Д33.

Основная часть

Задача автоматизированного планирования является достаточно новой и динамически развивающейся. Первые работы представлены в 1990-х годах [13]. Сама задача планирования в общем виде может быть поделена на три подзадачи, как это показано на рисунке 1. В работе последовательно будут рассмотрены подходы по решению каждой из подзадач.

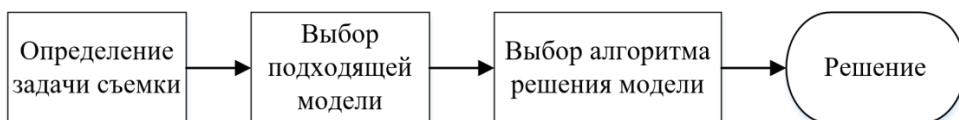


Рисунок 1 – Схема решения задачи планирования

1. Определение задачи съемки.

Первой подзадачей при планировании съемок является выбор начальных и граничных условий. На этом этапе определяются взаимодействующие объекты и их основные параметры: количество КА, типы целевой аппаратуры (ЦА), орбиты функционирования и характеристики КА, типы снимаемых объектов, накладываемые ограничения для получения качественных снимков и прочее. Рассмотренные работы можно распределить следующим образом: по количеству КА в ОГ и типу ЦА, по типу объекта наблюдения и по типу рабочей среды съемки. Рассмотрим каждый из предложенных классов в отдельности.

1.1. Классификация по количеству КА в ОГ и типу ЦА.

В зависимости от количества спутников и типов полезной нагрузки планирование съемок Д33 можно разделить на планирования миссии одного КА, ОГ с единым типом ЦА и различных комбинаций аппаратов с разнотипной ЦА. В силу того, что ОГ КА Д33 стали появляться относительно недавно, наиболее исследованной является задача планирования съемок единичного аппарата. Ее решению посвящены такие работы, как [1, 3, 15, 16, 20, 27, 32].

В настоящее время наиболее активно проходят исследования задачи планирования ОГ КА с единым типом ЦА [14, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 28, 29, 30]. Модель, описывающая ОГ имеет существенно больше объектов и связей между ними, поэтому к алгоритмам ее решения предъявляются серьезные требования по быстродействию решения. Для группировок небольшой размерности допустимо применять решения, полученные при планировании съемок единичного аппарата, однако с увеличением количества КА в ОГ необходимо предла-

гать другие решения, зачастую связанные с применением мультиагентного подхода.

Также имеют место задачи планирования съемок ОГ с разнотипными ЦА и единичных КА с несколькими ЦА, установленными одновременно. Обе задачи не распространены в силу небольшого количества подобных КС. Однако, для решения задачи круглосуточного всепогодного мониторинга поверхности Земли необходимо одновременное функционирование как оптических, так и радарных КА, поэтому подобная задача может стать актуальной в ближайшее время. Для решения первой задачи в основном используются наработки, полученные при планировании съемок ОГ КА [21, 26, 28]. Предлагается планировать отдельно съемки оптической и радарной ОГ, а затем объединять их в общий план, однако, для повышения целевых характеристик имеет смысл рассмотреть совместное планирование всей системы. Решение второй задачи описано в еще меньшем количестве работ [10, 11]. Кроме того, благодаря развитию технологий, также могут появиться аппараты с установленными одновременно оптической и радарной ЦА и тогда станет актуальной задача планирования съемок подобными КА.

1.2. Классификация по объекту наблюдения.

Как правило выделяют два типа объектов наблюдения: точечные и площадные. К точечным целям относят области, изображение которых может быть получено одним кадром (изображение может быть получено одним КА за один сеанс съемки). Площадные объекты могут быть сняты с нескольких витков, либо же несколькими КА. Остальные типы объектов не распространены, а планирование их съемки происходит комбинацией предложенных методов. Однако также стоит выделить коридорные объекты (полосы, проходящие под большими углами к подспутниковой трассе, которые также могут быть ломанными). Для проведения съемки подобных объектов требуется управлять КА по всем углам (крен, тангаж и рысканье) [27].

Поскольку точечная цель может быть снята единичным спутником, задача планирования ДЗЗ аппаратом, ориентированным на съемку точечных объектов, может быть сформулирована следующим образом: требуется определить время, за которое N заданных объектов будут сняты M КА. Планирование съемки подобных объектов является относительно простой задачей.

Задача планирования съемок площадных объектов делится на две подзадачи: декомпозиция заданной цели на доступные для съемки КА объекты и задачу планирования съемки полученных объектов [18, 19, 22, 26]. При планировании съемки подобных объектов стоит учитывать, что при съемках с соседних витков, различными аппаратами или под различными углами качество полученных снимков может существенно различаться. Существуют также и отдельные методики адаптации площадных объектов для съемки космическими аппаратами [24].

1.3. Классификация по типу рабочей среды.

При планировании съемок поверхности Земли рабочую среду можно рассматривать как статическую и динамическую. При планировании съемок статической рабочей среды считается, что условия съемки (не только светотеневая

обстановка и облачность, но и количество и приоритетность объектов съемки) не изменяется в процессе выполнения миссии, а вся информация известна заранее. Планирование происходит на Земле и после закладки на КА модуля полетного задания (МПЗ) его изменение не предполагается. Большая часть существующих работ посвящена именно такому подходу. Однако, с развитием многоспутниковых ОГ, появляются исследования, посвященные динамическому планированию, которое позволяет реагировать на изменяющиеся условия [3, 5, 12, 23, 29, 30] (что может быть особенно эффективно с использованием межспутниковой линии связи).

Подводя итог, можно сказать, что большая часть новых работ посвящена планированию съемок орбитальными группировками в силу их активного развития. Достаточно большое количество предложенных методик сводится к планированию миссии каждого единичного КА, входящего в состав ОГ, что оказывается не эффективным при увеличении размерности группировки. Однако в последнее время появляются методики распределенного динамического управления, согласно которым МПЗ формируется для всей группировки в целом, что позволяет динамически перераспределять задание между аппаратами внутри ОГ, повышая её эффективность [23, 30, 31].

2. Модель, описывающая космическую систему.

Модель описывает всю КС, взаимодействия внутри неё, а также объекты и условия съемки. Все модели делятся на физическую, которая наиболее полно описывает рассматриваемую систему, но при этом является наиболее трудоемкой при решении, физико-математическую и математическую, которые используются в большинстве исследований.

2.1. Модель удовлетворения ограничениям.

Такая математическая модель определяется списком переменных, для каждой из которых задан набор возможных значений и ограничений, которым переменные должны удовлетворять. Модель отлично подходит для решения задач комбинаторики, включая задачи планирования и теории расписаний [7]. Кроме того, она подходит для решения задач с использованием алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ), что становится достаточно важным в последнее время.

Формально модель может быть описана следующим образом:

$$\mathbf{M} = \langle \mathbf{T}, \mathbf{S}, \mathbf{A}, \mathbf{C} \rangle, \quad 1)$$

где \mathbf{T} – набор задач на съемку. Каждая из задач содержит множество параметров, описывающих требования к съемке;

\mathbf{S} – список всех доступных КА. При этом каждый параметр содержит множество характеристик конкретного спутника;

\mathbf{A} – набор действий, выполняемых КА;

\mathbf{C} – набор ограничений, наложенных на КА.

Параметры, описывающие КС многочисленны и сложны, при этом они не всегда вносят существенный вклад в решение задачи планирования съемок, при этом увеличивая трудоёмкость процесса решения. Именно поэтому от грамотно-

го выбора учитываемых параметров зависит не только качество полученного решения, но и быстродействие всего расчета. Некоторые работы, в которых описывается решение задачи планирования с использованием модели удовлетворения ограничениям [8, 27].

2.2. Общие модели.

Задача о многомерном рюкзаке – задача комбинаторной оптимизации. В общем виде она формулируется следующим образом: задано множество предметов, каждый из которых обладает параметрами «стоимость» и «вес». Необходимо укомплектовать рюкзак подмножеством с ограничением по весу, которое будет обладать максимальной стоимостью. Применительно к задаче планирования эта модель рассматривается следующим образом: существует n объектов съемки, каждый из которых расходует p ресурсов КА (к примеру, электроэнергии и объема запоминающего устройства), при этом имея w ценности [9].

Модель ориентированного графа. Применительно к задаче планирования спутниковой съемки, авторы предлагают рассматривать задачу получения изображения Земли как вершину графа, а различные атрибуты, такие как время начала и конца съемки, требуемое разрешение и другие, добавляются к списку свойств вершины [6, 20]. Узлы же располагаются в порядке времени выполнения задач. Далее на этом основании строится упорядоченный по времени ориентированный граф. Такая модель подходит для планирования задач единичного космического аппарата, однако при рассмотрении нескольких аппаратов, сложность модели многократно увеличивается.

Мультиагентная модель – модель, в которой существует множество агентов, имеющих индивидуальное поведение и характеристики. Агенты находятся в единой среде и взаимодействуют внутри неё для достижения общих или индивидуальных целей. Мультиагентные системы в настоящее время стали наиболее эффективными для решения сложных системных задач. В свою очередь, как уже было сказано, планирование съемки космическими аппаратами включает в себя большое количество различных элементов и даже несколько систем. В отличие от других, мультиагентная модель обладает определенной степенью интеллекта и автономности, за счет чего подходит для оперативного планирования задач в автономной спутниковой системе. Это может быть полезно при парировании непредвиденных нештатных ситуаций. Однако такой тип модели чаще всего построен на структуре ведущий-ведомый, что снижает надежность всей системы. Подобный подход в настоящее время активно набирает популярность, ниже приведены некоторые работы, посвященные его использованию [22, 23, 29, 30].

3. Алгоритм решения выбранной модели.

Выбор подходящего алгоритма также является очень важной задачей. Именно верный алгоритм позволяет получить рациональное решение задачи за приемлемое время. Для решения относительно простой задачи планирования миссии единичным аппаратом подходит достаточно большое число различных алгоритмов, но с увеличением размерности КС выбор правильного алгоритма становится ключевой задачей.

Эвристические алгоритмы. Общей структуры таких алгоритмов не суще-

стует, поскольку они создаются специально для решения конкретной задачи. В рассмотренных работах [12, 26, 28] эвристические алгоритмы предлагаются для решения задачи планирования миссии в условиях неопределенных погодных условий и для решения задачи перераспределения плана съемки внутри ОГ. Отсюда можно сделать вывод, что такие алгоритмы подходят для решения задачи динамического планирования съемок Земли.

Эволюционные алгоритмы моделируют законы биологической генетической эволюции и основаны на операциях мутации, селекции и выявления лучших решений. Чаще всего среди эволюционных алгоритмов встречаются различные вариации генетического алгоритма, который достаточно универсален, благодаря чему с его помощью можно учитывать наибольшее число разнородных ограничений. Однако генетический алгоритм является трудоёмким при решении, поэтому для задачи планирования его необходимо дорабатывать: к примеру, использовать сочетание глобального и локального поиска или предварительно классифицировать решения для отбраковки неэффективных на ранних этапах поиска.

Алгоритм роевого интеллекта – эволюционный алгоритм случайного поиска, который основан на вероятности и имитирует, в основном, поведение птиц и насекомых. Наиболее часто в работах встречается муравьиный алгоритм, который отлично подходит для приближённого решения задачи коммивояжёра. Суть алгоритма заключается в использовании модели поведения муравьёв, ищущих пути от колонии к источнику питания. При использовании такого алгоритма стоит учитывать, что у него существует вероятность зацикливания поиска решения.

Алгоритм локального поиска, начиная с исходного решения, постоянно выполняет поиск в локальном пространстве и выборочно перемещается в соответствии с оптимальным решением. Чаще всего применяют запретный алгоритм поиска, поскольку он позволяет избежать ситуаций, когда локальный максимум выдается за оптимальное решение, проводя поиск по всей глобальной области и сравнивая локальные максимумы между собой. Кроме того, встречается применение алгоритма имитации отжига. Этот вероятностный алгоритм, хоть и не дает гарантии сходимости, однако на практике хорошо подходит для быстрого поиска приближенного решения. В целом, алгоритмы локального поиска на данный момент позволяют получать решение за наименьший промежуток времени.

Точные алгоритмы. Такие алгоритмы, хоть и позволяют найти оптимальное решение, но используются предпочтительно для решения простых задач, поскольку их решение занимает большое количество времени. Они подходят для планирования миссии единичного аппарата, однако, в условиях тенденции к переходу к ОГ, применяются всё реже.

Алгоритмы, использующие ИИ. В настоящее время активно развивается использование ИИ для решения задачи планирования съёмок КА ДЗЗ. Так, к примеру, в 2018 году коллектив учёных использовал нейронные сети для определения приоритета съёмки, после чего, с применением эвристического алгоритма, сформировал план съёмки [2]. Также описано решение задачи многомерного рюкзака применительно к планированию съёмок с использованием алгоритма обучения с подкреплением [4]. Уже сейчас видно, что применение ИИ при решении задачи планирования существенно повышает эффективность расходования

ресурсов. Именно алгоритмы ИИ в будущем позволят получать методики, эффективно решающие задачу динамического планирования.

Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что в настоящее время большее количество исследований посвящено планированию миссий ОГ КА ДЗЗ, при чём упор делается именно на динамическое планирование съёмок, и данная задача всё ещё не решена. Кроме того, стоит отметить, что задача планирования съёмок ОГ с разнотипными ЦА, либо же КА с одновременно установленными разными ЦА также решена не до конца и исследований по этой теме не много.

В работе рассмотрены модели и алгоритмы, используемые для решения поставленной задачи. В последнее время для описания КС (особенно для ОГ) всё чаще используется мультиагентная модель, поскольку она хорошо подходит для описания сложных систем с большим количеством переменных и ограничений. Одного алгоритма, подходящего для решения любой задачи, не существует и разработчикам необходимо выбирать конкретный алгоритм исходя из поставленной цели. Однако, стоит отметить, что в будущем фокус сместится на алгоритмы, использующие ИИ.

Единое универсальное решение задачи оптимального планирования съёмок в настоящее время отсутствует. Кроме того, КС постоянно развиваются и совершенствуются, а к информации ДЗЗ предъявляются всё новые серьёзные требования. В силу этого, задача формирования методики оптимального планирования съёмок на данный момент всё ещё является актуальной.

Литература

1. Du B., Li S., She Y., Li W., Liao H. and Wang H. Area targets observation mission planning of agile satellite considering the drift angle constraint // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. vol. 4. no. 4. 2018.
2. Li C. and Chen Y. Data-driven onboard scheduling for an autonomous observation satellite // 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). The Swedish. 2018.
3. Yuan G. On-Line Dynamic Planning of Missions for Ground Imaging of Agile Remote Sensing Satellites // Harbin Engineering University. 2019.
4. Wang H., Yang Z., Zhou W. and Li D. Online scheduling of image satellites based on neural networks and deep reinforcement learning // Chinese Journal of Aeronautics. vol. 32. no. 4. pp. 1011-1019. 2019.
5. Cpa J. and Ggb L. On the Need for Dynamic Scheduling of Imaging Satellites. 2012.
6. Wang J., Jing N., Li J. and Chen Z.H. A multi-objective imaging scheduling approach for earth observing satellites // Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation. London. England. 2007.
7. Kautz H., Selman B. Planning as Satisfiability // Proceedings of European Conference on Artificial Intelligence ECAI-92. Vienna. 1992. P. 359-363.

8. Guohui L. Robust Mission Planning Model and Algorithm for Multi-Imaging Autonomous Satellites, Harbin Institute of Technology. 2018.
9. Jung-Hyun L., Myung W.S., Chung D. et al. Multi-satellite control system architecture and mission scheduling optimization // 2012 IEEE aerospace conference. MT. USA. 2012.
10. Longmei L. Research on Key Technologies of Multi-Aircraft and Multi-Load Earth Observation Mission Planning // National University of Defense Technology. 2013.
11. Yin L. Research on Target Access Calculation and Task Scheduling Method of Multi-Load Earth Observation Satellite // National University of Defense Technology. 2012.
12. Wang M., Dai G. and Vasile M. Heuristic scheduling algorithm oriented dynamic tasks for imaging satellites // Mathematical Problems in Engineering. vol. 2014. no. 5. p. 11. 2014.
13. Hall N.G. and Magazine M.J. Maximizing the value of a space mission // European Journal of Operational Research. vol. 78. no. 2. pp. 224-241. 1994.
14. Nan S. Research and Application of Multi-Satellite Distributed Collaborative Mission Planning Technology // University of Chinese Academy of Sciences. 2015.
15. Peng S., Chen H., Li J. and Jing N. A heuristic method for single satellite observation and transmission tasks planning // 2017 13th international conference on natural computation, fuzzy systems and knowledge discovery (icnc-fskd). Guilin, China. 2017.
16. Chu X., Chen Y. and Tan Y. A branch and bound algorithm for agile earth observation satellite scheduling // Advances in Space Research. vol. 2017. no. 9. pp. 1-15. 2017.
17. Yingen Z. Research on Autonomous Mission Planning Model and Algorithm of Multi-Imaging Satellites // Harbin Institute of Technology. 2017.
18. Архипова Н.А., Золотой С.А., Корзун В.М. и др. Автоматизированная система оперативного анализа реализуемости дистанционного зондирования Земли // Системный анализ и прикладная информатика. № 3. 2016. С. 4-11.
19. Безняков А.М., Горбулин В.И., Каргу Д.Л. и др. Методика оптимального планирования применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в обзорном режиме // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 1(39). С. 39-45.
20. Бузуев К.В. Определение оптимальных планов наблюдения космического аппарата дистанционного зондирования Земли с помощью графа // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королёва. 2013. № 1(39). С. 63-72.
21. Вишневский А.К., Горбулин В.И., Летунов В.В. и др. Метод квазиоптимального планирования целевого применения орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в условиях критического времени // Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. № 1. С.57-69.
22. Галузин В.А., Симонова Е.В. Планирование съемки площадных объектов наблюдения группировкой космических аппаратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 6(2). С. 344-351.

23. Городецкий В.И., Карсаев О.В. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2017. № 2(187). С. 234-247.
24. Григорьев А.Н., Замарин А.И., Караваев М.Н. Метод формирования групповых объектов для космических средств дистанционного зондирования Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Том 15. № 4. 2015. С. 587-594.
25. Дарнопых В.В., Усовик И.В. Автоматизация параметрического анализа целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли. Труды МАИ, 2011. №47.
26. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А. и др. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Труды МАИ, 2017. № 96.
27. Ковтун В.С., Строченкин А.В., Фролов В.Н. Выбор оптимальных вариантов маршрутов съемок для космической системы дистанционного зондирования Земли // Космическая техника и технологии. 2014. № 3(6). С. 57-63.
28. Розин П.Е., Смольянинов Ю.А. Оценка влияния текущих метеопрогнозов в задаче планирования космической съемки // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2021. № 22(2). С. 139-147.
29. Скобелев П.О., Скирмунт В.К., Симонова Е.В. и др. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. С. 60-70.
30. Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В. и др. Модели сетевентрических задач планирования и управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов при решении задачи дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1(56). С. 34-38.
31. Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В. и др. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1(62). С. 16-26.
32. Усовик И.В., Дарнопых В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ. Труды МАИ, 2013. № 65.

УДК 621.78:621.793

Замена меднения припуском на механическую обработку при изготовлении деталей из нержавеющих сталей в машиностроении

Владимир Владимирович Гончаров, кандидат технических наук,

ведущий инженер-технолог,

Валерий Юрьевич Пиунов, кандидат технических наук,

заместитель начальника производства,

АО «НПО Лавочкина», г. Химки, Московская область

Специфика производства компонентов для машиностроения определяет повышенные требования к качеству получаемых деталей. Поэтому любые нештатные ситуации в технологическом процессе изготовления деталей ответственного назначения являются поводом для пристального изучения. В данной статье рассматриваются вопросы исключения меднения как защитной операции от окисления окончательно изготовленных деталей из нержавеющих сталей при термической обработке, так как после металлизации возможно появление тёмных пятен на поверхности. Приводится оценка качества полученных деталей. Предложенные меры и проведённые исследования позволяют оптимизировать производственные затраты, что весьма востребовано для предприятий машиностроения.

Нержавеющие стали, меднение, термическая обработка, окисление, припуск.

To the issue of replacing copper plating with machining allowance when manufacturing parts from stainless steels in mechanical engineering

Vladimir Vladimirovich Goncharov, candidate of technical sciences,
leading engineer-technologist,

Valerij Yurevich Piunov, candidate of technical sciences, deputy production manager,
Lavochkin Association, JSC, Khimki, Moscow region

The nature for mechanical engineering components production demand higher quality standards. Thus, any contingency in technological process of critical components production is a cause for close analysis. This article deals with the issues of excluding copper plating as a protective operation against oxidation of final manufactured parts made of stainless steels during heat treatment, because after metallization it is possible to appear dark spots on the surface. An assessment of the produced components quality is given. The proposed measures and conducted researches allow to optimize production costs, which is very demanded for machine-building enterprises.

Stainless steels, copper plating, heat treatment, oxidation, allowance.

Введение

В машиностроении детали должны обладать высокой стойкостью к динамическим, вибропрочностным, ударным, акустическим, циклическим нагрузкам

при требуемых (повышенных и/или пониженных) температурах эксплуатации. Необходимо тщательно изучать наиболее часто возникающие дефекты на изделиях, изготовленных по типовым технологическим процессам, с целью недопущения их в будущем [1, 2]. Поэтому качество поверхности окончательно изготовленных деталей для машиностроения требует пристального внимания на всём жизненном цикле их производства.

Детали из нержавеющих марок сталей, подвергаемых термообработке на твердость HRC не менее 40, в действующей технологии АО «НПО Лавочкина» на термообработку поступают окончательно изготовленными. Поэтому для предупреждения образования окалины и выгорания легирующих элементов на поверхности деталей применяется меднение окончательно обработанных поверхностей. После снятия меди периодически возникают трудно идентифицируемые пятна [3, 4], которые впоследствии нужно удалять гидропескоструйной обработкой.

Окончательно изготовленные детали под слоем меди проходят термическую обработку, в процессе которой возникают внутренние фазовые и термические напряжения. Эти остаточные напряжения могут вызвать искажение формы (коробление) и изменение размеров изделия во время его обработки, эксплуатации или хранения.

Цель данной работы: исключить омеднение окончательно обработанных поверхностей деталей, оставляя минимально возможный припуск, величину которого необходимо определить. Величины припуска должно быть достаточно, чтобы скорректировать химический состав поверхностного слоя и изменение размеров в процессе фазовых превращений после процесса термообработки.

Исследования проводили на заготовках из нержавеющих сталей 40Х13 (мартенситная сталь), 95Х18 (мартенситная сталь), 16Х16Н3МАД (мартенситоферритная сталь). Образцы подготавливались на металлорежущих станках. Химический состав материалов определялся спектрометрами ДФС-500 и СПЕКС ЛАЭС модификации МАТРИКС. Твёрдость измерялась при помощи микротвердомера ПМТ-3, твердомера универсального МЕТОЛАБ 703. Размеры контролировались микрометром Mitutoyo (0-25 мм, 0,001 мм). Термическая обработка заготовок проводилась в нагревательных камерных печах и соляных ваннах.

Размеры образцов для исследования представлены на рисунке 1, которые выбирались из наиболее распространенного сортамента на предприятии для изготовления деталей. Наиболее распространённые в технологии предприятия 6-7 квалитеты. Они используются при оценке ответственных соединений деталей. В неответственных деталях, не входящих в соединения с другими деталями, используются допуски из 14-16 квалитетов. Предельные отклонения размеров образцов на рисунках 1, 2 соответствуют 14 квалитету. Химические составы исследуемых сталей представлены в таблицах 1-3. Для определения химического состава материала достаточно шероховатости поверхности Ra12,5.

Так как в нашем случае измерялась микротвёрдость на ПМТ-3, то со стороны торцов образцов шероховатость испытуемой поверхности образца не должна была быть грубее Ra0,32 и поэтому была отполирована.

Результаты исследований и их обсуждение

Для получения твердости не менее HRC 40 была проведена следующая

термическая обработка:

- сталь 40Х13:

1) подогрев изделий перед закалкой: температура подогрева $550 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 17 мин; после прогрева был произведен быстрый перенос в соляную ванну для закалки;

2) закалка с непрерывным охлаждением: температура нагрева $1040 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 9 мин; охлаждение в масле;

3) низкотемпературный отпуск: температура нагрева $200 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 2 ч 30 мин; охлаждение на воздухе;

- сталь 95Х18:

1) подогрев изделий перед закалкой: температура подогрева $550 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 12 мин; после прогрева был произведен быстрый перенос в соляную ванну для закалки;

2) закалка с непрерывным охлаждением: температура нагрева $1040 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 10 мин; охлаждение в масле;

3) обработка холодом: температура охлаждения минус $60 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 2 ч 20 мин; выгрузка из установки на воздухе;

4) низкотемпературный отпуск: температура нагрева $180 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 8 ч; охлаждение на воздухе;

- сталь 16Х16Н3МАД:

1) подогрев изделий перед закалкой: температура подогрева $550 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 15 мин; после прогрева был произведен быстрый перенос в соляную ванну для закалки;

2) закалка с непрерывным охлаждением: температура нагрева $1060 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 9 мин; охлаждение в масле;

3) обработка холодом: температура охлаждения минус $60 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 2 ч 20 мин; выгрузка из установки на воздухе;

4) низкотемпературный отпуск: температура нагрева $180 \pm 10^{\circ}\text{C}$; выдержка 2 ч 20 мин; охлаждение на воздухе.

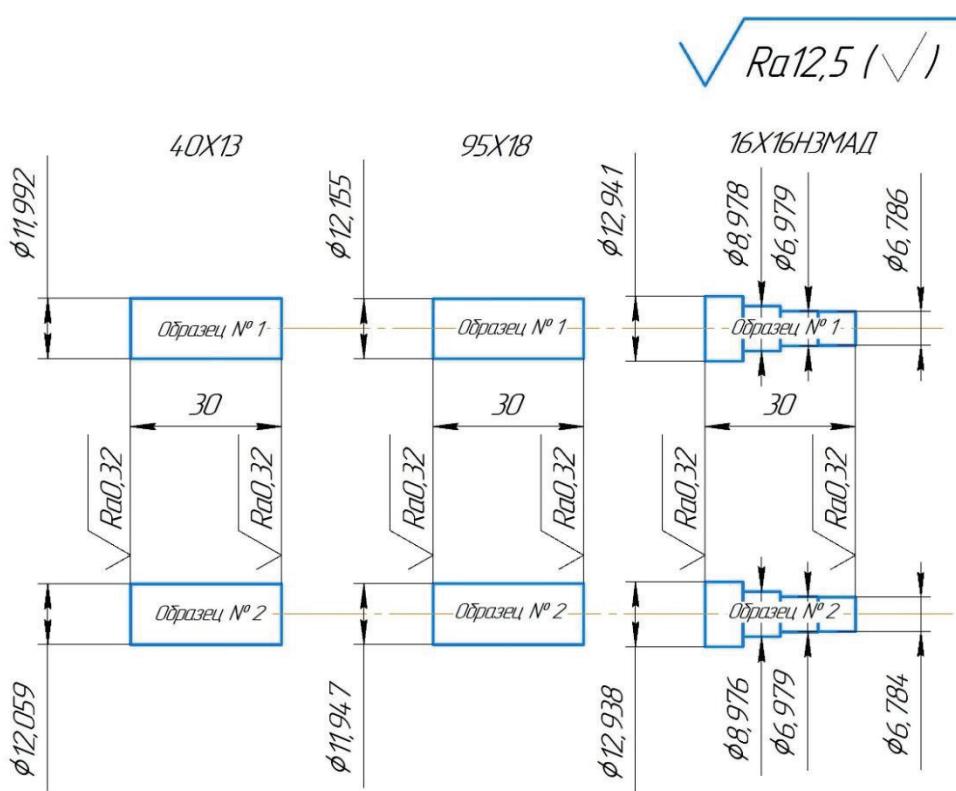


Рисунок 1 – Исходные размеры образцов из нержавеющих сталей

Таблица 1 – Химический состав стали 40Х13

Сталь 40Х13		Химический состав, %				
Номер образца	Состояние материала	Cr	Mn	Si	Ni	C
	ГОСТ 5632-2014	12,00-14,00	≤ 0,80	≤ 0,80	–	0,36-0,45
1	до ТО	13,1	0,45	0,3	0,2	0,39
	после ТО	12,83	0,39	0,51	0,19	0,35
	после ТО и после зачистки	12,81	0,45	0,3	0,2	0,36
	после ТО и после снятия материала 0,1 мм	13,18	0,40	0,32	0,22	–
2	до ТО	12,96	0,45	0,3	0,2	0,40
	после ТО	12,26	0,38	0,57	0,17	0,36
	после ТО и после зачистки	12,8	0,45	0,3	0,2	0,37
	после ТО и после снятия материала 0,2 мм	12,92	0,43	0,32	0,24	–
Примечание – ТО (термическая обработка)						

Таблица 2 – Химический состав стали 95Х18

Сталь 95Х18		Химический состав, %				
Номер образца	Состояние материала	Cr	Mn	Si	Ni	C
ГОСТ 5632-2014		17,00-19,00	≤ 0,80	≤ 0,80	–	0,90-1,00
1	до ТО	17,43	0,28	0,58	0,23	0,95
	после ТО	17,03	0,22	0,70	0,2	0,91
	после ТО и после зачистки	17,17	0,28	0,57	0,24	0,94
	после ТО и после снятия материала 0,1 мм	18,11	0,23	0,37	0,16	–
Примечание – ТО (термическая обработка)						

Таблица 3 – Химический состав стали 16Х16Н3МАД

Сталь 16Х16Н3МАД		Химический состав, %						
Номер образца	Состояние материала	Cr	Mn	Si	Ni	Cu	Mo	C
ТУ 14-1-3791-84		15,00-16,50	0,60-1,00	≤ 0,60	2,00-4,00	1,00-1,50	1,40-1,90	0,13-0,19
1	до ТО	15,7	0,64	0,27	2,49	1,12	1,40	0,15
	после ТО	14,9	0,62	–	2,12	1,07	1,34	0,13
	после ТО и после зачистки	14,9	0,61	0,18	2,27	1,06	1,34	0,14
	после ТО и после снятия материала 0,1 мм	15,24	0,65	0,17	2,31	1,05	1,46	–
Примечание – ТО (термическая обработка)								
2	до ТО	16,1	0,65	0,30	2,10	1,14	1,43	0,16
	после ТО	15,2	0,64	–	2,05	1,05	1,35	0,14
	после ТО и после зачистки	15,4	0,63	0,19	2,06	1,03	1,36	0,18
	после ТО и после снятия материала 0,2 мм	15,5	0,68	0,17	2,32	1,05	1,46	–

После термической обработки была проведена очистка поверхности от окалины гидропескоструйной обработкой. Далее проводилось измерение размеров образцов (рис. 2). Анализ изменения размеров представлен в таблице 4. Видно, что при взаимодействии металла при повышенной температуре с нагревательной средой и с атмосферой печи размеры уменьшились приблизительно до 0,01 мм. Исходя из этого необходимо для окончательного изготовления деталей оставлять припуск перед термической обработкой для нержавеющих сталей не менее 0,01 мм для восполнения потерь объёма металла.

Распределение химических элементов после термообработки представлено в таблицах 1-3 (см. «после ТО» и «после ТО и после зачистки»). Зачистка проводилась в спектральной лаборатории при помощи наждачной бумаги с зернистостью Р 40 и поэтому глубина снятия поверхностного слоя не регламентировалась. Анализ данных показал, что во всех образцах сталей после термообработки произошло выгорание хрома. Обезуглероживание поверхности на образцах наблюдается незначительное, не выходящее за допустимый интервал технических требований.

В стали 16Х16Н3МАД содержание молибдена в исходном состоянии находилось на нижнем пределе. Поэтому после термической обработки произошло уменьшение содержания молибдена за рамки допустимых значений из-за воздействия высоких температур. Также в этой стали сильно уменьшилось содержание полезной примеси кремний.

Чтобы проверить верность утверждения об окончательном припуске более 0,01 мм для исследуемых нержавеющих сталей была произведена механическая обработка образцов со снятием слоя материала 0,1 мм и 0,2 мм со стороны торцов образцов. Практически окалина для сталей начинает образовываться при температуре от 500°C до 600°C. Толщина окалины и глубина обезуглероженного слоя растут с повышением температуры и времени выдержки и не зависят от размеров деталей. Увеличивается лишь время сквозного прогрева изделия, которое практически не влияет на дефектный слой материала, возникший из-за воздействия атмосферы печи. Толщина этого слоя бывает различная (у деталей из легированных сталей она до 0,5 мм, а из углеродистых сталей от 0,5 до 1,0 мм) в зависимости от конфигурации, габаритных размеров детали и других факторов. Для исследуемых нержавеющих сталей, из-за их специфики, эта толщина меньше. Поэтому для данного исследования и был выбран припуск с размерами 0,1 мм и 0,2 мм.

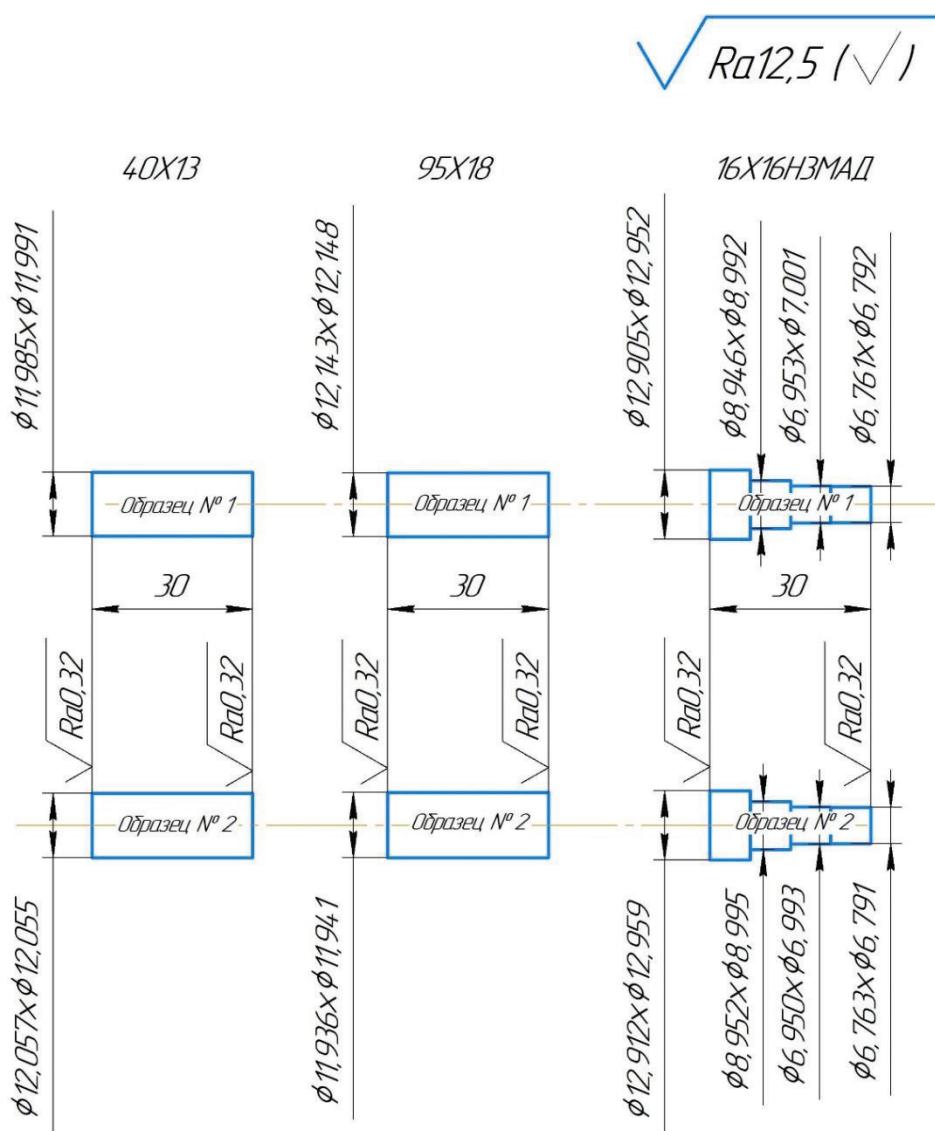


Рисунок 2 – Размеры образцов после термической обработки

Реальные размеры деталей данных сталей на предприятии выбираются исходя из общих эксплуатационных, технологических и экономических требований. Первыми параметрами, определяющими выбор стали, являются механические свойства и распределение их по сечению детали. Это распределение зависит от вида термической обработки и от прокаливаемости сталей. По прокаливаемости реальные размеры деталей из исследуемых сталей по толщине должны быть примерно до 60 мм.

Определение химического состава обработанных поверхностей на образцах после снятия слоя материала 0,1 мм и 0,2 мм представлен в таблицах 1-3, а результаты измерения твёрдости показаны в таблице 5.

Таблица 4 – Аналитика изменения размеров образцов

Сталь	Номер образца	Диаметр до ТО, мм	Диаметр после ТО, мм	Среднее значение, мм	Изменение диаметра, мм	Округление изменения до сотых, мм
40Х13	1	11,992	11,985×11,991	11,988	0,004	0,00
	2	12,059	12,057×12,055	12,508	0,003	0,00
95Х18	1	12,155	12,143×12,148	12,146	0,009	0,01
	2	11,947	11,936×11,941	11,939	0,008	0,01
16Х16Н3МАД	1	12,941	12,905×12,952	12,929	0,013	0,01
	1	8,978	8,946×8,992	8,969	0,009	0,01
	1	6,979	6,953×7,001	6,977	0,002	0,00
	1	6,786	6,761×6,792	6,777	0,009	0,01
	2	12,938	12,912×12,959	12,936	0,002	0,00
	2	8,976	8,952×8,995	8,974	0,003	0,00
	2	6,979	6,95×6,993	6,972	0,007	0,01
	2	6,784	6,763×6,791	6,777	0,007	0,01
	Примечание – ТО (термическая обработка)					

Наибольшее соответствие данных химического анализа и твёрдости требованиям нормативной документации наблюдается на поверхности образцов, обточенных на 0,2 мм.

Следовательно, для окончательно изготовленных деталей из сталей 40Х13, 95Х18, 16Х16Н3МАД перед термообработкой с учётом разнообразного влияния атмосферы печи или среды нагрева (охлаждения) рекомендуется оставлять припуск не менее 0,2 мм на размер.

Припуск на механическую обработку приблизительно следует увеличивать на 0,3 мм (0,2 мм погрешность на фазовые и термические напряжения при термической обработке; 0,1 мм погрешность эксперимента), что будет составлять не менее 0,5 мм.

Окончательная обработка резанием для получения требуемых размеров и точности детали формируется механическими цехами шлифованием или электроэрозионной обработкой на последней стадии производства изделия с учетом определенного нами припуска не менее 0,5 мм.

По данным экономистов цеха гальванических покрытий и термической обработки стоимость одного часа работы по нанесению меди на поверхность сталей равна 932,94 руб·ч (данные 2024 года). Процесс меднения длится от девяти часов.

По данным экономистов механического цеха стоимость одного часа работы по снятию припуска 0,5 мм с размера коррозионно-стойких сталей равна 442,64 руб·ч (данные 2024 года). Время снятия припуска составляет до одного часа.

Таким образом, с экономической точки зрения нанесение меди является более трудозатратным для производства, а также более длительным во времени, что однозначно оправдывает её замену припуском механической обработкой.

Таблица 5 – Твердость образцов после термической обработки

Номер образца	TO образцы	После снятия материала	Твердость, HRC		
			ближе к периферии поверхности со стороны торца	между периферией и осью торца	ближе к оси торца
1	Сталь 40Х13	0,1 мм	HRC 40-41	–	HRC 46-48
2			HRC 42-43	–	HRC 46-48
1		0,2 мм	HRC 45-47	HRC 44-45	HRC 45-46
2					
1	Сталь 95Х18	0,1 мм	HRC 54-55	–	HRC 57-59
2			HRC 54-55	–	HRC 57-59
1		0,2 мм	HRC 52-54	HRC 53-55	HRC 54-55
2					
1	Сталь 16Х16Н3МАД	0,1 мм	HRC 40-42	–	HRC 50-52
2			HRC 42-43	–	HRC 51-52
1		0,2 мм	HRC 45-47	HRC 51-53	HRC 53-54
2					

Заключение

Детали из нержавеющих сталей, подвергающиеся термообработке на твёрдость HRC не менее 40 необходимо изготавливать с припуском не менее 0,5 мм, если конфигурация детали позволяет изготовить её без применения более затратной медной металлизации.

Литература

1. Маркелов Е.Е., Преображенский Е.В., Гончаров В.В., Галкин В.И. К вопросу совершенствования технологии горячей объёмной штамповки при изготовлении поковок для деталей ракетно-космической техники // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 4. С. 111-117. DOI: 10.26162/LS.2023.62.4.016.
2. Гончаров В.В., Григорьев П.С., Маркелов Е.Е. [и др.]. Оптимизация процессов горячей обработки давлением при изготовлении деталей из алюминиевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 1. С. 43-48.
3. Гончаров В.В., Севастьянов А.С., Григорьев П.С., Плаксин А.М. Возникновение тёмных пятен на поверхности деталей из коррозионно-стойкой стали 95Х18 после термической обработки с меднением и пути решения этой задачи в ракетно-космической технике // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2024. № 3(65). С. 43-47. DOI 10.26162/LS.2024.87.63.006. EDN VIATKT.
4. Гончаров В.В., Севастьянов А.С., Григорьев П.С., Плаксин А.М. О механизмах образования темных дефектов на поверхности деталей из нержавеющей стали 95Х18 после термической обработки под слоем меди // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22. № 7. С. 328-332. DOI: 10.36652/1684-1107-2024-22-7-328-332.

УДК 669.04

**Влияние обработки порошковых материалов
в планетарной мельнице на состав и структуру матрицы
композиционного материала, полученной методом RMI**

Дмитрий Владимирович Смирнов, инженер-технолог АО «Композит»,
г. Королев, Московская область

Изготовлены углерод керамические композиционные материалы (УККМ), матрица которых сформирована методом реакционной пропитки расплавом шихт из порошков циркония и кремния, обработанных в планетарной мельнице. Проведено исследование влияния обработки смеси порошков на состав и структуру матрицы композиционного материала. Показано, что проведение обработки порошковых смесей в планетарной мельнице повышает кажущуюся плотность УККМ, объемную долю керамических фаз в матрице, а также улучшает технологические свойства используемых шихт.

Композиты, реакционная пропитка расплавами, матрица, механическая обработка.

Influence of powder materials processing in planetary mill on composition and structure of composite material matrix obtained by RMI method

Dmitriy Vladimirovich Smirnov, engineer technologist JSC «Kompozit»,
Korolev Moscow region

The carbon ceramic composite materials (CCM), matrix of which is formed by reaction melt impregnation method with the use of charge from zirconium and silicon powders processed in planetary mill, have been produced. The influence of powder mixture processing on the composition and structure of the composite material matrix has been investigated. It is shown that the processing of powder mixtures in a planetary mill increases the apparent density of UCCM, the volume fraction of ceramic phases in the matrix, as well as improves the technological properties of the used charge.

Composites, reaction melt impregnation, matrix, mechanical processing.

Введение

Керамические матрицы в УККМ формируют различными методами: реакционная пропитка расплавом (RMI), пропитка предкерамическим прекурсором с последующим пиролизом (PIP), химическое осаждение из газовой фазы (CVI), золь гель и т.д., либо их комбинацией. В данной работе для получения керамической матрицы в УККМ был применен метод RMI, который обладает важным преимуществом в сравнении с другими – скорость формирования матрицы [1]. Так, например, если для формирования керамической матрицы методом CVI требуются сотни часов [2], то методом RMI матрица формируется менее чем за час. Также, как и для всех способов, степень заполнения пор углеродной преформы

керамической матрицей зависит от ее пористости и размеров пор, но в отличии от метода CVI, качество матрицы, содержание в ней керамической составляющей, при использовании метода RMI, зависит от взаимодействия расплава шихты с поверхностью пор [3]. При этом на взаимодействие расплава с углеродной поверхностью, в том числе на угол смачивания, оказывают влияние и такие факторы как примеси, условия термообработки, структура углерода подложки, состав и структура исходной шихты. Так, например, результаты пропитки пористой углеродной преформы расплавом систем ZrSi, сформированной из различных шихт, например, из порошка дисилицида циркония ($ZrSi_2$) или смеси порошков циркония и кремния при равном атомном содержании элементов в первом и втором варианте, будут различными [4]. На качество формирующей керамической матрицы также влияют такие параметры порошков как гранулометрический состав, морфология поверхности частиц порошка, которые можно регулировать обработкой в различных мельницах.

Целью работы является исследование влияния обработки порошковых материалов в шаровой вращающейся мельнице (ШВМ) планетарного типа на состав и структуру матрицы композиционного материала, полученной методом RMI.

Материалы и методика

В работе использовались порошки циркония марки ПЦЭ ЗР (ТУ 95 259 99) и кремния марки КР 00 (ГОСТ 2169 99). Размол проводили в ШВМ планетарного типа. Размольные стаканы и шары изготовлены из карбида вольфрама, сре-да размола – изопропиловый спирт (ТУ 2632 064 44493179 01), скорость вращения стакана составляла 350 об/мин. Первая партия образцов шихт готовилась смещиванием порошков циркония и кремния методом «пьяная бочка», а порошки циркония и кремния предварительно раздельно обрабатывались в мельнице с шарами. В зависимости от времени обработки порошков в мельнице партии шихт были пронумерованы Р0, Р4, Р16, Р32 (Р0 – порошки не проходили обработку в мельнице с шарами). Образцы второй группы шихт готовились совместным смещиванием порошков циркония и кремния с обработкой шарами в мельнице и были пронумерованы как С4, С16, С32 соответственно.

Для определения гранулометрического состава образцы порошков были исследованы методом лазерной дифракции. Фазовый состав определялся методом рентгеновской дифрактометрии (РПД), элементный состав методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Углеродные преформы представляли углерод углеродный композиционный материал (УУКМ) на основе каркаса из углеродных волокон, сформированный иглопробивным методом, и насыщенный пироуглеродом. Плотность преформы УУКМ составляла $1,28 \pm 0,01 \text{ г/см}^3$, открытая пористость – $22,3 \pm 0,1\%$.

Методом RMI с применением шихт Р0, Р4, Р16, Р32, С4, С16, С32 были сформированы керамические матрицы в пористых преформах УУКМ. Плотность полученных образцов углерод керамических композиционных материалов (УККМ) была определена с использованием метода гидростатического взвешивания.

Объемная доля керамических фаз (W) рассчитывалась по методике, опи-

санной в работе [5].

Результаты и их обсуждение

По результатам гранулометрического анализа установлено, что размер частиц порошка Si до размола находился в диапазоне до 50 мкм. После размола во всех пробах произошло усреднение гранулометрического состава, что выражается снижением высоты пика дифференциальной кривой и выпрямлением интегральной кривой. Также с увеличением длительности размола увеличивается доля субмикронной фракции (до 1 мкм) – за 32 мин их доля выросла с 14,2% до 24,7%.

Порошок Zr в исходном виде имеет размер частиц до 1985 мкм. После размола существенно выросли доли субмикронных (до 1 мкм) и микронных (1-10 мкм) частиц, что видно на графиках интегрального и дифференциального распределения размеров частиц до и после размола (рисунок 1).

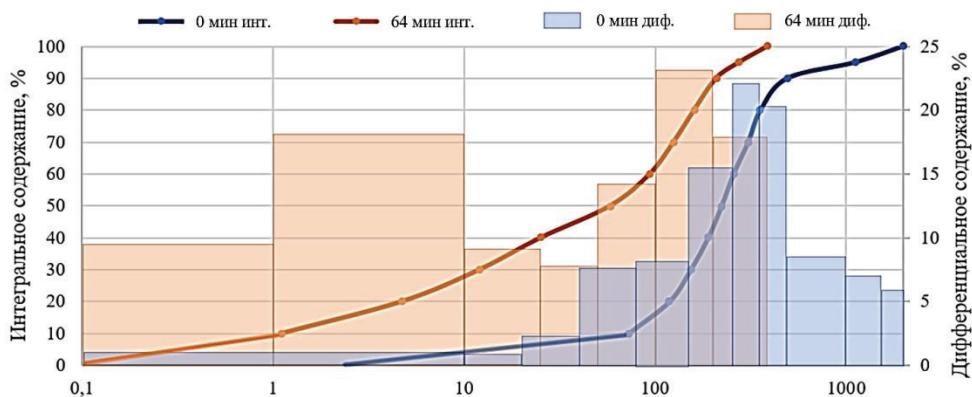


Рисунок 1 – Интегральные и дифференциальные графики процентного содержания частиц Zr до (0 мин) и после (64 мин) размола

Анализ интегральных кривых на рисунке 1 показывает, что наблюдается смещение кривой после размола в сторону уменьшения частиц и ее выпрямление. На дифференциальном графике после размола присутствует новый пик в области 1-10 мкм. При этом, пик крупных частиц сместился с 200-350 мкм до 100-150 мкм.

По результатам лазерной дифракции были построены зависимости максимального и медианного размера частиц от длительности обработки в мельнице (рисунок 2).



Рисунок 2 – Максимальный и медианный размеры частиц Zr в зависимости от длительности размоля в спирте

Из анализа графиков на рисунке 2 можно сделать вывод, что максимальные и медианные размеры частиц изменяются со схожими интенсивностями. Обе аппроксимационные кривые – гиперболы с близкими значениями степеней (0,39 и 0,38 для максимальных и медианных значений соответственно). При этом, средние ошибки аппроксимации составляют соответственно 6,5 и 12,0%. Наиболее интенсивное измельчение происходит на начальном этапе.

Анализ результатов РПД, которые представлены в таблице 1, позволяет утверждать, что окисления порошков не наблюдается поскольку после размоля оксидов циркония (ZrO_2) не обнаружено, а количество оксида кремния (SiO_2) в порошке Р32 осталось неизменным относительно исходного Р0. В пробах Zr после размоля обнаружен карбид ZrC , что, возможно, указывает на взаимодействие порошка с материалом стакана и шаров, при этом ни в одной из проб вольфрам или карбид вольфрама не обнаружены.

Таблица 1 – Составы порошков Zr и Si до и после размоля/смешивания

Шихта	Материал размоля	Формула фазы	Кристаллическая решетка	Массовая доля, %
Р0	Порошок Zr	Zr	Гекс. Р 63/m m c	100
	Порошок Si	Si	Куб. F d 3 m	97
Р32	Порошок Zr	SiO ₂	Гекс. Р 31 2 1	3
	ZrC			
Порошок Si	Zr	Гекс. Р 63/m m c	98	
	Si	Куб. F d 3 m	2	
C32	SiO ₂	Гекс. Р 62 2 2	97	
	Zr	Гекс. Р 63/m m c	3	
	Si	Куб. F d 3 m	8	
				92

Стоит отметить, что в фазовом составе С32 доля Si больше, чем в исходном составе. По-видимому, интенсивность пиков Zr была снижена из-за формирования на поверхности слоя из частиц Si. Данное предположение подтвержда-

ется результатами, полученными при исследовании С32 методом СЭМ. На рисунке 3 представлена крупная частица Zr покрытая порошком Si.

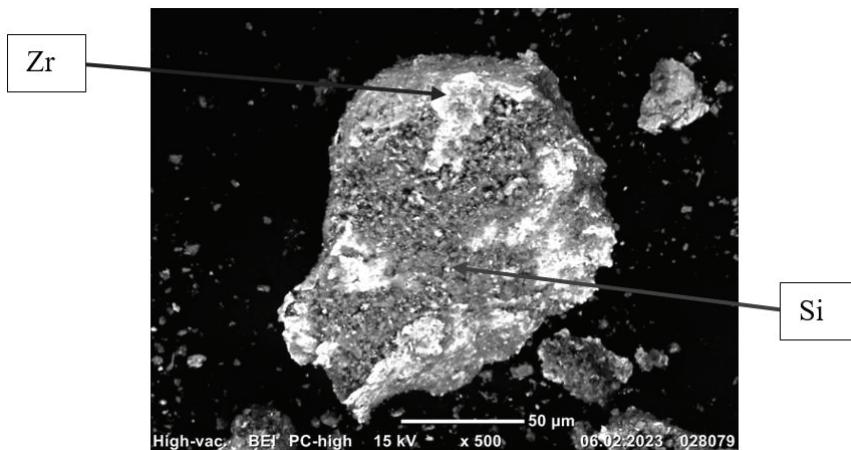


Рисунок 3 – Снимок С32 при увеличении $\times 500$

Исходные образцы преформы УУКМ для проведения РМП имели следующие физические свойства: кажущаяся плотность $1,28 \pm 0,01 \text{ г/см}^3$, открытая пористость $22,3 \pm 0,1\%$. Свойства УККМ после пропитки УУКМ методом РМП различными шихтами представлены в таблице 2. В ходе нанесения шликерного покрытия было замечено, что шлиkerы на основе молотых порошков дольше седimentируются за счет малого размера частиц (более 20 мин), в сравнении с исходной шихтой (~ 3 мин).

Таблица 2 – Свойства УККМ после пропитки УУКМ методом РМП

Шихта	Кажущаяся плотность, г/см^3	Открытая пористость, %	Расчетная объемная доля керамической матрицы, %
P0	$2,59 \pm 0,02$	$4,6 \pm 0,2$	$32,0 \pm 1,5$
P4	$2,59 \pm 0,03$	$4,4 \pm 0,1$	$35,2 \pm 1,2$
P16	$2,63 \pm 0,01$	$4,8 \pm 0,4$	$35,7 \pm 1,0$
P32	$2,61 \pm 0,01$	$4,3 \pm 0,3$	$34,7 \pm 0,7$
C4	$2,62 \pm 0,04$	$4,0 \pm 0,4$	$34,2 \pm 2,3$
C16	$2,63 \pm 0,01$	$4,1 \pm 0,2$	$34,5 \pm 0,4$
C32	$2,60 \pm 0,01$	$4,3 \pm 0,1$	$33,8 \pm 0,8$

Анализ результатов процесса РМП, представленных в таблице 1, показал:

– При пропитке порошковыми материалами, размолотыми в спирте (P4, P16, P32), заметен рост кажущейся плотности и объемной доли карбидных фаз;

– Подготовка исходных компонентов в виде смесей (C4, C16, C32) оказывает большее влияние на количество керамической матрицы, чем размол по отдельности. Наблюдается повышение плотности на $0,01\text{--}0,04 \text{ г/см}^3$, объемной доли керамической матрицы на 1,8-2,5% и снижение открытой пористости на

~0,5%. При этом, увеличение длительности смешивания свыше 4 мин на качество пропитки УУКМ не влияет.

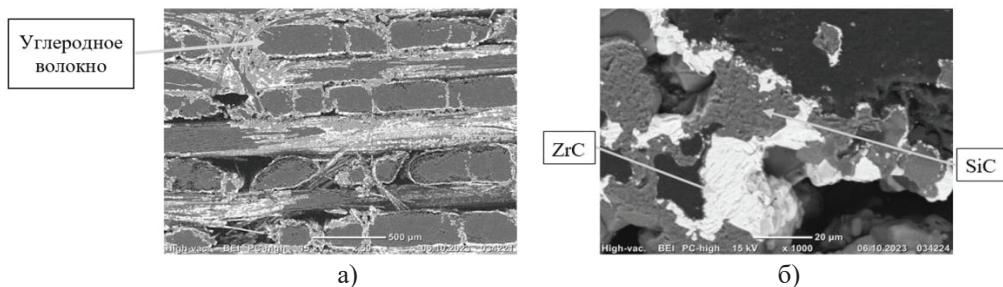


Рисунок 4 – Снимок шлифа образца УККМ, пропитанного шихтой Р0 при увеличениях: а) – ×50; б) – ×1000

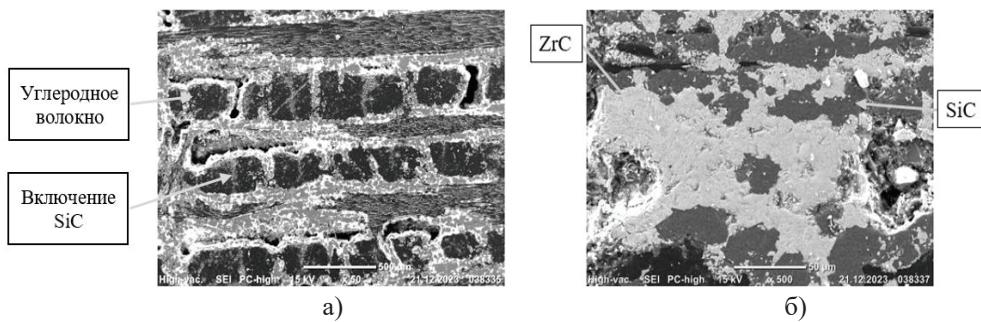


Рисунок 5 – Снимок шлифа образца УККМ, пропитанного шихтой Р16 при увеличениях: а) – ×50; б) – ×500

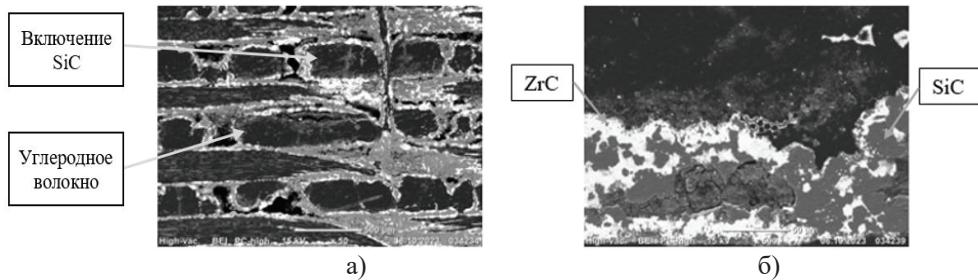


Рисунок 6 – Снимок шлифа образца УККМ, пропитанного шихтой С16 при увеличениях: а) – ×50; б) – ×500

Анализ снимков СЭМ (рисунки 4-6) снятых со шлифов показал, что полученные матрицы в направлении от стенки поры вглубь, имеют трехслойную структуру.

Первый слой располагается непосредственно у поверхности поры и содержит SiC с добавлением мелкодисперсного ZrC. Его толщина изменяется в зависимости от типа пропитки: от 1 мкм для образца с пропиткой Р0 до 4 мкм при использовании размолотого порошка. В работе [6] утверждается, что SiC компенсирует разницы температурных коэффициентов расширения между ZrC и ар-

мирующим наполнителем, что препятствует его появлению трещин. Таким образом, увеличение толщины этого слоя может положительно повлиять на стойкость материала к окислению при высоких температурах за счет снижения количества дефектов.

Второй слой характеризуется неоднородной структурой и состоит преимущественно из ZrC с включениями SiC. Толщина этого слоя для всех образцов варьируется в широком диапазоне – от 1 до 60 мкм.

Третий слой представляет собой SiC с редкими включениями ZrC. В этом слое также наблюдаются поры, которые не были заполнены расплавом во время обработки.

Выводы

В процессе размоля в планетарной шаровой мельнице были выявлены закономерности изменения размеров частиц. Получены уравнения аппроксимации для максимальных и медианных размеров частиц, которые имеют близкие значения степеней (0,39 и 0,38 соответственно). Анализ результатов РПД показал, что окисления порошков не происходит.

Результаты пропитки УУКМ методом RMI свидетельствуют о том, что размол порошков в спирте (P4, P16, P32) увеличивает кажущуюся плотность и объемную долю карбидных фаз. Смешивание исходных компонентов (C4, C16, C32) оказывает большее влияние на количество керамической матрицы, повышая плотность и снижая пористость. Анализ снимков, полученных с помощью СЭМ, показывает, что матрицы имеют схожую трехслойную структуру. Наблюдается увеличение толщины первого слоя, содержащего SiC у образцов, прошедших обработку в ШВМ, что может повысить стойкость материала к окислению при высоких температурах.

Литература

1. Dewei N.I. Advances in ultra high temperature ceramics, composites, and coatings // Journal of Advanced Ceramics. 2022. №11. С. 1-56.
2. Naslain R. The CVI processing of ceramic matrix composites // Le Journal de Physique Colloques. 1989. № 50. С. 191-207.
3. Dezellus D. Wetting and infiltration of carbon by liquid silicon // Journal of Material Science. 2005. № 40. С. 2307-2311.
4. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. М.: Машиностроение, 1996. 306 с.
5. Кордикова Е.И. Композиционные материалы. М.: БГТУ, 2007. 232 с.
6. HuoC. Microstructure and high temperature antiablation behavior of Cr modified ZrC coating for SiC coated carbon/carbon composites // Ceramics International. 2019. № 45. С. 1777-1789.

УДК 661.665

Влияние пористой структуры углерод-углеродного композиционного материала на получение керамической матрицы методом RMI

Анна Николаевна Яговкина, ведущий инженер-технолог,
Акционерное общество «Композит» (АО «Композит»),
г. Королев, Московская область

В данной статье проведены исследования структуры различных углеродных каркасов, которая влияет на характеристики получаемого углерод-керамического композиционного материала (УКМ). Показаны результаты порометрических исследований углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), томографического анализа, исследования микроструктуры посредством микрорентгеноспектрального анализа УКМ с SiC матрицей, полученной при пропитке расплавами (RMI). Определены параметры, влияющие на окислительную стойкость материала. Сформулирован критерий пропитки. Установлено влияние пористой структуры различных пористых УУКМ на состав и распределение матрицы.

Керамическая матрица, структурная ячейка, пористая структура, окислительная стойкость.

The influence of pore structure of carbon-carbon composite material on ceramic matrix formation by RMI method

Anna Nikolaevna Yagovkina, leading industrial engineer,
Joint-Stock Company «Composite» (JSC «Composite»), Korolev, Moscow region

This article provides information about the various carbon structures which influence on performance of carbon-ceramic composite materials. The results of porosity measurement, tomography analysis, microstructure of SiC ceramic matrix materials receive by reactive melt infiltration are presented. A relationship between parameters of impregnation and oxidation resistance is proposed. The criterion of impregnation is received. The influence of the porous structure carbon-carbon composite materials on the matrix composition and distribution is established.

Ceramic matrix, structural cell, pore structure, oxidation resistance.

Существующие теплонагруженные материалы, такие как металлические сплавы и многокомпонентная керамика не соответствуют в полной мере современным конструкционным требованиям из-за недостаточно высоких рабочих температур (до 1200 °C) и повышенной трещиностойкости соответственно [3, С.120]. Применение УУКМ, обладающих высокими физико-механическими характеристиками при повышенных температурах, низким ТКЛР, высокой теплопроводностью, устойчивостью к тепловому удару [4, С.551], ограничено из-за интенсивного окисления при температурах выше 500 °C, что предполагает фор-

мирование высокотемпературной матрицы [2, С.156]. При этом развитая объемная пористая структура углеродного каркаса оказывает существенное влияние на все физико-механические, теплофизические и химические свойства деталей из них [1, С.203]. По данным отечественных и зарубежных исследователей ключевыми факторами, влияющими на свойства получаемого материала, в частности, окислительную стойкость являются ориентация волокон от которой зависит проникновение расплава в ходе пропитки и как следствие содержание керамической фазы в пропитанном слое, химический состав матрицы и размер структурной ячейки [5, С.11913].

Структура материалов и методы их исследования

В качестве исходных материалов были выбраны УУКМ с различным размером структурной ячейки и типом углеродной матрицы. УУКМ 1 представляет собой пропитанную каменноугольным пеком с последующими отверждением, карбонизацией и высокотемпературной обработкой (ВТО) трехмерно-армированную иглопробивную преформу с размером структурной ячейки порядка $0,5 \times 0,7$ мм. УУКМ 1 состоит из ткани на основе углеродных волокон, уложенных последовательно и пробитых перпендикулярно слоям для создания Z координаты. При замене углеродной матрицы на основе кокса пека на пироуглеродную, сформированную методом газофазного изотермического осаждения, получали УУКМ 2. При использовании углеродного наполнителя в виде спрессованного ПАН-волокна получали пространственно-армированный каркас – армирующую основу для формирования УУКМ 3 и 4 с размером структурной ячейки, сравнимой размером волокна ~ 10 мкм. УУКМ 3 и 4 получали при пропитке наполнителя каменноугольным пеком, карбонизации и ВТО.

В качестве исходной порошковой смеси был выбран однокомпонентный состав на основе кремния.

Открытую пористость различных УУКМ определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139-69.

Исследование пористой структуры, определение размера и объемного содержания пор, открытой пористости и плотности исследуемых материалов проводили на эталонном поромере «Porosimeter 3.2».

Исследование структуры УКМ разного состава на предмет отсутствия скрытых макродефектов, а также глубины пропитки расплавами при высокотемпературной обработке проводили методом рентгеновской томографии с помощью рентгеновской томографической системы XT H 320 LC фирмы «METRIS».

Для изучения микроструктуры УКМ, определения элементного состава по толщине образца был проведен микроструктурный анализ на подготовленных шлифах на сканирующем электронном микроскопе с рентгеновским спектрометром.

Результаты и их обсуждение

Влияние пористой структуры УУКМ – основы для получения УКМ – на состав и распределение матрицы

Глубина пропитки в значительной мере обусловлены характером пористой структуры и распределением пор в УУКМ (величиной объема пор, размерами и конфигурацией пор, их распределением по всему объему материала, доступностью для проникновения расплава) [2, С.158]. Вследствие чего был прове-

ден порометрический анализ исследуемых типов УУКМ с разным размером структурной ячейки на базе интегральных и дифференциальных распределений пор. Полученные результаты количественного анализа пор в исследуемых образцах УУКМ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Количествоное распределение пор в пористых УУКМ

Тип УУКМ	Диапазон распределения пор				
	1 нм – 1 мкм	1 мкм – 10 мкм	10 мкм – 40 мкм	40 мкм – 100 мкм	> 100 мкм
УУКМ 1	9,1%	39,0%	40,6%	5,0%	6,3%
УУКМ 2	15,3%	69,7%	10,1%	4,9%	0,0%
УУКМ 3	44,6%	52,6%	2,8%	0,0%	0,0%
УУКМ 4	56,8%	39,5%	3,2%	0,0%	0,0%

По результатам исследований выявлено, что в УУКМ 3 и 4 диапазон радиуса пор варьируется преимущественно от 1 нм до 10 мкм, структура является однородной. УУКМ 1 и 2 отличаются типом углеродной матрицы, что сказывается значительно на распределении пор. В УУКМ 2 пироуглерод осаждается по стенкам пор в виде тонкого слоя с постепенным их заполнением, а пек преимущественно формируется внутри поры, поэтому количество пор до 1 мкм в УУКМ 2 превалирует по сравнению с УУКМ 1 [2, С.160]. На диапазон от 1 до 40 мкм приходится около 80% всего объема пор УУКМ 1 и 2, однако присутствуют и более крупные поры размером преимущественно до 100 мкм. Исходя из результатов порометрии предполагалось, что наибольшая глубина пропитки однокомпонентным составом будет достигнута в образцах, изготовленных из УУКМ 2.

Формирование матриц на основе SiC в различных пористых структурах УУКМ

Для определения влияния пористой структуры на глубину и равномерность пропитки, а также содержание SiC проводилась пропитка однокомпонентным составом всех типов исследуемых УУКМ с получением УККМ. При этом пропитку образцов разного состава проводили одновременно. На рисунке 1 представлены результаты томографического анализа.

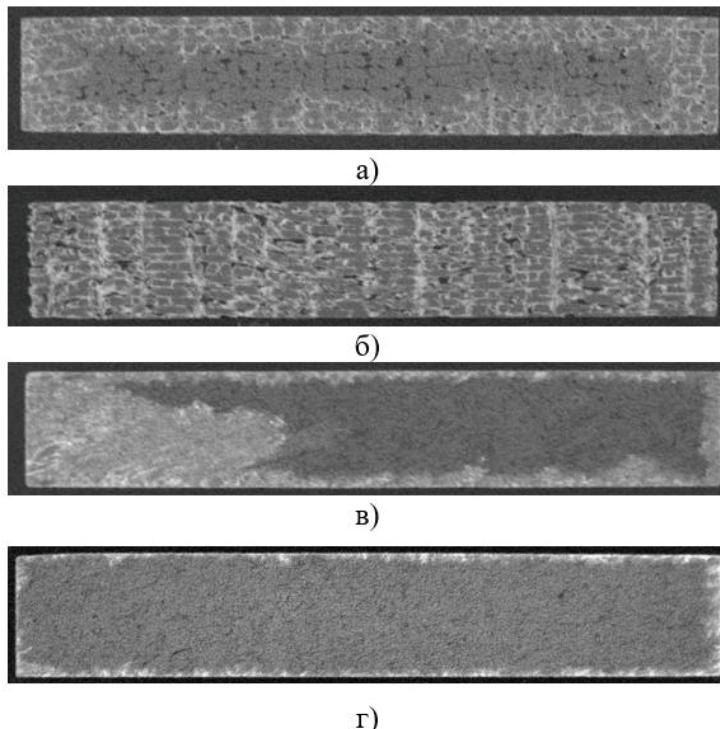


Рисунок 1 – Формирование SiC матрицы в различных УККМ:
а) – УККМ 1; б) – УККМ 2; в) – УККМ 3; г) – УККМ 4

Пропитка УККМ 2 прошла на всю глубину, при этом замечены оставшиеся крупные поры по всей толщине образца. Однородная исходная структура УККМ 3 способствует более равномерному распределению SiC на большей части приповерхностной области образца. Наличие обширной зоны, насыщенной SiC, может быть вызвана повышенной химической активностью однородной пористой структуры. Кстати, этим фактором может быть обусловлена и меньшая толщина пропитанного слоя в УККМ 3.

Существуют трудности в определении параметра пропитки, который позволит предсказать окислительную стойкость материала. При значительной глубине пропитки возможно низкое локальное содержание карбидов в структуре материала, что не приведет к формированию сплошного защитного окисленного слоя. По результатам томографии был введен критерий β , который позволяет оценить количество карбидов в заданном объеме и тем самым сравнить насыщенность различных материалов.

Значения критерия β , а также других параметров пропитки различных материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры пропитки различных УККМ

Параметр	УККМ			
	1	2	3	4
Пористость (открытая) исходная, %	14,2	22,2	22,1	13,2
Средняя глубина пропитки, мм	1,5	4,0	2,4	0,6
Объемное содержание карбидов в 1 мм ³ пропитанного слоя, β , %	6,9	10,7	17,3	15,5

Несмотря на неглубокую пропитку кремнием образцов УККМ 1 и 3, содержание SiC в пропитанной зоне отличается практически в 2,5 раза, что связано с различием в количестве и конфигурации поровых каналов. При этом все показатели пропитки у УККМ 1 ниже, чем у других материалов. Несмотря на высокие значения объемного содержания карбидов в УККМ 2, концентрация карбидов в заданном объеме существенно ниже, чем в УККМ 3. Увеличение открытой пористости в исходном материале способствует увеличению глубины пропитки и объемного содержания карбидов.

Микрофотографии различных УККМ после формирования SiC матрицы представлены на рисунке 2. Структура пористого пространства в УККМ 2 приводит к образованию крупных включений свободного кремния в количестве около 15% и значениях около 2% в УККМ 3 при соизмеримом объеме пор в исходной структуре. Температура плавления кремния существенно отличается от температуры разложения карбида кремния, что приведет к испарению кремния при низких (выше 1500 °C) температурах в ходе воздействия окислительного потока и возникновению дополнительных путей для диффузии кислорода.

Отмечено, что каждый филамент в УККМ 3 в пропитанной зоне покрыт слоем карбида кремния, а на каркасе 2 из комплексной нити проникновения пропитывающего компонента не замечено. Это связано с увеличением отношения площади поверхности пор к их объему (S/V) в УККМ 3.

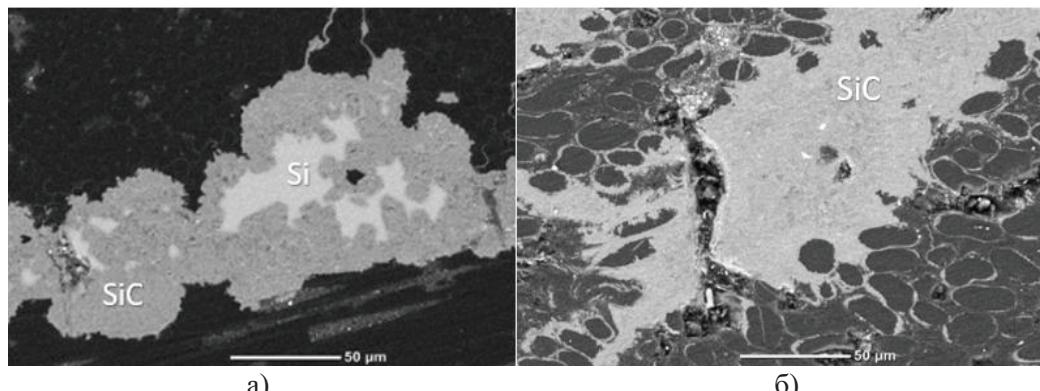


Рисунок 2 – Микроструктура УККМ с SiC матрицей при x500-кратном увеличении:
а) – УККМ 2; б) – УККМ 3

Показано, что структура углеродного каркаса влияет на формирование

керамической матрицы. Сформулированный критерий пропитки β позволяет провести объективную оценку степени насыщения керамического слоя в различных материалах. Отмечено, что однородное распределение пор при их среднем значении около 1 мкм в каркасе с размером структурной ячейки порядка 10 мкм препятствует образованию крупных включений свободного кремния при формировании SiC-матрицы. Наличие защитного керамического слоя на поверхности филаментов в УККМ 3 связано с равномерным распределением структурных элементов (волокна и матрицы) в составе исходного углеродного каркаса.

Литература

1. Колесников С.А. Оптимизация структуры углерод-углеродных композиционных материалов с целью повышения окислительной стойкости для эксплуатации в высокотемпературных конструкциях // Сборник тезисов докладов «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». 2016. С. 203-207.
2. Яговкина А.Н. Влияние пористой структуры углерод-углеродного композиционного материала на формирование высокоплотной высокотемпературной керамической матрицы методом RMI // Информационно-технологический вестник. 2023. № 3. С. 156-166.
3. Baroumes L., Bouillon E., Christin F. An improved long life duration ceramic matrix composite material for jet aircraft engine applications // 24th international congress of the aeronautical sciences. 2009. P. 119-125.
4. Huang D., Zhang M., Huang Q. et al. Ablation mechanism of C/C-ZrB₂-ZrC-SiC composite fabricated by polymer and pyrolysis with preform of Cf/ ZrB₂ // Corrosion Science. 2015. Vol. 98. P. 551-559.
5. Xie J., Li K., Sun G. et. al. Effects of surface structure unit of 2D needled carbon fiber preform on the microstructure and ablation properties of C/C-ZrC-SiC composites // Ceramics International. 2019. Vol. 45. P. 11912-11919.

Адрес редакции:
141070, Королев,
ул.. Октябрьская, 10а
Тел.: +7 (495) 543-34-30 (доб. 138)

www.unitech-mo.ru

Формат 100x70/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.-печ. л. 10. Тираж 500 экз.
Заказ № 4890.

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов П.И.
394086, г. Воронеж, ул. Любы Шевцовой, 34,
тел.: +7 995 494-84-77, www.strokivrn.ru