

ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС — научно-техническому прогрессу России



- МАШИНОСТРОЕНИЕ



- ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

- СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ
И ИЗМЕРЕНИЯ



2'2023



Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России
(4 выпуска)
Подписной индекс **79379**
Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал
Конструкции из композиционных материалов
(4 выпуска)
Подписной индекс **80089**
Издается с 1981 года



Научно-технический журнал
Информационные технологии в проектировании и производстве
(4 выпуска)
Подписной индекс **79378**
Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал
Экология промышленного производства
(4 выпуска)
Подписной индекс **80090**
Издается с 1993 года



Научно-практический журнал
Вопросы защиты информации
(4 выпуска)
Подписной индекс **79187**
Издается с 1974 года

Все издания ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);
факс: 8 (495) 491-44-80.
E-mail: izdanie@ntckompas.ru

2 ОБОРОННЫЙ (158) КОМПЛЕКС - научно-техническому прогрессу России

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1984 г.

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Колпин М. А., Проценко П. А., Хлебников С. Г. Метод планирования передачи информации в системе связи с динамической топологией сети на основе обхода графа в ширину 3

Щеглов Д. К., Сайбель А. Г., Фёдоров Д. А. Применение возможностей технологий искусственного интеллекта для проведения поисковых научных исследований в области организации производства 11

МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Билецкая В. В., Жеребин А. М., Топорова М. И., Широков А. И. Обоснование оптимальной размерности беспилотного летательного аппарата для решения задачи обнаружения пожаров в лесном массиве. Часть 2. Мониторинг совокупности секторов лесного массива. Эвристические процедуры 20

Топоров Н. Б., Мирошкин В. Л., Вавилов Д. С. Подход к построению комплекса ситуационного моделирования функционирования группировки транспортной авиации при решении транспортно-десантных задач 25

ИЗМЕРЕНИЯ. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Халилюлина Н. Б. Состояние и перспективы цифровизации процессов проектирования и разработки наукоёмкой высокотехнологичной продукции 32

Петленко Д. Б. Удаленный контроль качества питательной смеси для гидропонных установок 40

Бердибеков А. Т., Юров В. М., Грузин В. В., Доля А. В. Влияние внешней среды на микротрещины деталей военной техники 45

Рябчиков П. В., Назаренко М. А. Совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции на основе создания систем технологического обеспечения надежности продукции 51

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ОБОРУДОВАНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. РАДИОТЕХНИКА. ЭЛЕКТРОНИКА

Костин М. С., Шадинов С. С., Латышев К. В., Коняшкин Г. В., Корчагин А. С. Векторное формирование сигнальных радиоизображений методом сканирующей спектрально-временной развертки 56

Сгибнев А. К., Савин Д. А. Реализация когнитивного радиоприема на базе USB RTL-SDR 64

Главный редактор

И. А. Шеремет, акад. РАН, проф., заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по научной работе

Заместители главного редактора

Ю. А. Чаплыгин, акад. РАН, д-р техн. наук, проф., президент, заведующий кафедрой «Интегральная электроника и микросистемы», МИЭТ

С. А. Матвеев, канд. техн. наук, начальник Центра автоматических космических систем и комплексов ФГУП "ЦНИИмаш"

Ответственный секретарь — К. В. Трыкина,

начальник отдела научных и информационных изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Редакционная коллегия:

В. И. Борисов, акад. РАН, проф., научный руководитель — зам. генерального директора по научной работе ОАО «Концерн «Созвездие»; **Б. А. Григорьев**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, научный руководитель Центра исследований пластовых систем и технологического моделирования ООО «Газпром ВНИИГАЗ», зав. кафедрой «Исследование нефтегазовых пластовых систем» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; **С. Ю. Желтов**, акад. РАН, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ФГУП «ГосНИИАС»; **И. А. Каляев**, акад. РАН, проф., директор НИИ многопроцессорных вычислительных систем ЮФУ (НИИ МВС ЮФУ); **В. М. Кашин**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., генеральный директор — генеральный конструктор ФГУП «Конструкторское бюро машиностроения»; **Ю. Н. Коптев**, д-р техн. наук, проф., председатель научно-технического совета Госкорпорации «Ростехнологии»; **В. Е. Лукашук**, канд. техн. наук, директор ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; **Ю. И. Маевский**, д-р техн. наук, проф., генеральный конструктор систем и средств РЭБ — зам. генерального директора по инновациям и научной работе ОАО «Концерн Радиоэлектронные технологии»; **Б. В. Обносков**, д-р техн. наук, проф., действительный член РАН, генеральный директор — генеральный конструктор ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»; **В. В. Рыжиков**, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, проф., профессор кафедры «Техническое управление качеством» Пензенского государственного технологического университета (Пенз. ГТУ); **Л. Г. Сидоренко**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАН, генеральный конструктор по специальной тематике ОАО «ЦКБ МТ «Рубин»; **П. А. Созинов**, д-р техн. наук, проф., генеральный конструктор ОАО «Концерн ПВО «Алмаз—Антей»; **Н. И. Турко**, д-р воен. наук, канд. техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, проф., первый вице-президент Академии военных наук

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»), 2023

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России: Межотр. науч.-техн. журнал / Федеральное государственное унитарное предприятие «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2023. Вып. 2. С. 1—68.

Компьютерная верстка: *Н. В. Ильина, К. В. Трыкина*

Подписано в печать 20.06.2023.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,9. Уч.-изд. л. 8,2.

Тираж 250 экз. Заказ 2017.

Свободная цена.

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское ш., 77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано: 101000, Москва,

Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, помещ. IX, ком. 15, 16

ООО «Спиди-Принт.ру»

Индекс 79379.

УДК 629.78

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_3

EDN: FUFKWW

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ СВЯЗИ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ОБХОДА ГРАФА В ШИРИНУ

М. А. Колпин, канд. техн. наук; П. А. Проценко, канд. техн. наук;

С. Г. Хлебников, канд. воен. наук

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

Предложен метод планирования передачи информации в системе связи с динамической топологией сети, основанный на модификации известного алгоритма обхода графа в ширину. Модификация алгоритма для решения динамической задачи заключается в том, что на каждом дискрете времени для каждой вершины графа, отобранной для включения в маршрут передачи информации, оценивается возможность передачи информации в другие вершины с учетом имеющихся ограничений на время существования и вес ребер их соединяющих. Метод позволяет находить в динамическом графе такие маршруты передачи информации от вершин-источников к вершине-стоку, которые обеспечивают минимальное время доставки информации.

Ключевые слова: динамический граф, информационная система, пропускная способность, сеть связи, маршрут, оперативность.

Информационные системы (ИС), предоставляющие глобальные сервисы, как правило, имеют в своем составе стационарные и подвижные средства сбора, обработки и передачи (СОП) разнородной информации [1].

Рост требований потребителей к оперативности, полноте и достоверности информации, формируемой с использованием ИС, обуславливает необходимость увеличения количества средств СОП в составе ИС и повышения уровня их основных характеристик.

Одним из основных направлений снижения затрат на развитие и совершенствование ИС в интересах обеспечения требований потребителей является функциональная интеграция средств СОП, то есть построение ИС на базе многофункциональных узлов, способных добывать, обрабатывать, хранить и передавать информацию в системе.

Функциональная интеграция подвижных узлов ИС (например, мобильного, воздушного или космического базирования), имеющих, как правило, высокую скорость изменения относительного положения в пространстве, обуславливает динамику топологии сети в ИС. В связи с этим в разные моменты времени между двумя произвольными узлами сети могут иметься различные возможности по передаче информации, что в условиях роста интенсивности информационного обмена в ИС приводит к снижению оперативности доставки информации потребителю.

Кроме очевидных причин, связанных с возможным отсутствием или занятостью линий связи между подвижными узлами и их пропускной способностью, на оперативность доставки информации большое влияние оказывает технология планирования передачи информации. В первую очередь, это процедура выбора маршрутов передачи информации потребителю, а также количество блоков информации, на которые разбивается исходный объем логической единицы собранной информации (например, одного или серии снимков района наблюдения). При этом, чем больше количество маршрутов, по которым в сети передаются отдельные блоки информации, составляющие один снимок, тем больше системе потребуется времени, чтобы их передать и снова объединить в один снимок.

Колпин Михаил Александрович, докторант.

E-mail: vka@mil.ru

Проценко Петр Александрович, старший преподаватель кафедры.

E-mail: vka@mil.ru

Хлебников Сергей Германович, доцент, старший научный сотрудник.

E-mail: user72@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 мая 2023 г.

© Колпин М. А., Проценко П. А., Хлебников С. Г., 2023

Отсутствие при планировании передачи информации учета интенсивности сбора информации средствами СОП, пропускной способности линий связи между ними, а также параметров динамики сети связи обуславливает не только снижение оперативности, но и нарушение хронологического порядка получения потребителем информации, что приводит к снижению эффективности его функционирования.

Результаты анализа научно-методического задания в части планирования передачи информации в сетях связи с переменной структурой показали, что в данной области знаний выполнен достаточно большой объем исследований.

При формализованном описании указанные ИС представляют в виде динамических графов, в которых вершинами являются средства СОП, а ребрами — линии связи между ними [2]. Планирование передачи информации основывается на статических и динамических методах и алгоритмах поиска кратчайших путей или максимального потока в графах [3—8]. Указанные методы и алгоритмы позволяют решать соответствующие задачи, как правило, для конкретных видов динамических графов, например, с регулярно повторяющейся, фрактальной, медленно изменяющейся структурой сети и т. д. Однако их использование для планирования передачи информации в системах связи с динамической топологией сети в общем виде весьма затруднительно.

Таким образом, исследования, связанные с совершенствованием или разработкой новых методов планирования передачи информации в системах связи с динамической топологией сети являются актуальными.

Постановка задачи

Одним из целесообразных способов обеспечения оперативной доставки информации потребителю от средства СОП является нахождение такого кратчайшего пути (маршрута) в сети, который позволяет осуществить передачу всего объема логической единицы информации, сформированного средством СОП на очередном интервале времени, с учетом возможности разбиения данного объема на блоки (пакеты) информации и их передачи по данному маршруту в конечный узел сети (потребителю).

Задача планирования передачи информации в системе связи с динамической топологией сети может быть представлена в следующем виде. Пусть средства СОП в составе ИС заданы множеством многофункциональных узлов $V = \{v_i\}$, $i = \overline{1, I}$. Процесс сбора информации узлом v_i ха-

рактеризуется временем Δt , которое затрачивается на формирование объема логической единицы информации x_{il} и запись его в запоминающее устройство. В связи с этим исследуемый интервал функционирования ИС t предлагается представить в виде упорядоченного множества моментов времени $T = \{t_l\}$, $l = \overline{1, L}$, при этом $t_l = t_{l-1} + \Delta t$.

Кроме того, узел v_i характеризуется пропускной способностью линий связи для передачи информации в другие узлы ИС c_{ij} и количеством каналов связи q , организованных в рамках одной линии связи.

В общем случае на множестве V предлагается выделять: множество узлов-источников информации — $V_{\text{и}}$, которые обладают функционалом сбора и передачи информации в системе; множество узлов-ретрансляторов информации — $V_{\text{р}}$; множество узлов-потребителей информации — $V_{\text{п}}$. В рамках дальнейшей формализации задачи множество V дополнено конечным узлом v_k , связан со всеми $v_i \in V_{\text{п}}$.

Таким образом, средства СОП и линии связи образуют сеть связи в составе ИС, которую удобно представить в виде динамического графа: $G(t) = (V, E, C)$, где V — множество вершин, $V \times V \times T \rightarrow E = \{e_{ijl}, \forall i \neq j\}$ — множество ребер (линий связи), соединяющих вершины из V , а C — характеристики их пропускной способности.

Объем логической единицы информации x_{il} состоит из блоков (пакетов) информации заданного объема x_p . Собранную узлом v_i на интервале времени t_l информацию x_{il} необходимо передать за минимальное время в конечный узел v_k . При этом на динамическом графе $G(t)$ от каждого узла v_i к узлу v_k существует множество маршрутов, позволяющих передать x_{il} : $S_i = \{S_{il}^m\}$, где $S_{il}^m = [v_i, \dots, v_k]$ — m -й маршрут передачи информации, $m = \overline{1, M}$.

Множество всех планов передачи информации от узлов v_i к узлу v_k , содержащих S_{il}^m на интервале t , может быть представлено как $S_1 \times S_2 \times \dots \times S_I \rightarrow W = \{W_\gamma\}$, где $\gamma = \overline{1, G}$.

Тогда задача планирования передачи информации, формируемой узлами v_i на каждом t_l , в конечный узел v_k может быть сформулирована как отыскание такого плана $W^* \in W$, который

обеспечивает минимальное значение функции $F(W_\gamma)$, характеризующей оперативность передачи информации от источников к потребителю: $W^* = \operatorname{argmin}_{W_\gamma \in W} F(W_\gamma)$.

Под показателем оперативности здесь понимается математическое ожидание случайной величины времени передачи информации x_{il} от узлов v_i

к v_k в системе, т. е. $F(W_\gamma) = \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{l=1}^L O(S_{il}) / (I_n \cdot L)$,

где $O(S_{il})$ — время передачи информации x_{il} от узла v_i к узлу v_k , L — количество дискретов на интервале исследования, а I_n — количество узлов-источников информации.

Описание разработанного метода

Разработанный метод планирования передачи информации построен на основе алгоритма поиска в ширину [9], который представляет собой способ обхода графа, позволяющий выявить все существующие пути между двумя произвольными вершинами. Преимуществом данного алгоритма является линейное время сходимости относительно количества вершин и ребер в графе.

В целях адаптации алгоритма поиска в ширину к задаче поиска маршрутов передачи информации предлагаем провести его модификацию, а именно:

- ввести время появления очередных объемов информации в вершинах-источниках информации, которые необходимо передавать потребителю;
- на каждом дискрете времени и для каждой вершины графа, отобранной для включения в маршрут передачи информации, оценивать возможность передачи информации в другие вершины графа с учетом ограничений на время существования и вес ребер, соединяющих вершины;
- учитывать ограничения на возможность передачи информации, связанные с загруженностью линий связи в каждый момент времени;
- выбирать такой маршрут передачи информации, который позволит достичь вершину v_k за минимальное время.

Для этого в расчетных процедурах метода используют следующие дополнительные параметры:

- признак отбора узла для включения его в маршрут передачи информации f_i :

$$f_i = \begin{cases} 1, & v_i \in S_{il}; \\ 0, & v_i \notin S_{il} \end{cases};$$

- загруженность узла передачей информации на дискрете времени q_{ilr} ;
- множество интервалов времени существования линий связи L_i :

$$L_i = \{ \langle t_{nj}; t_{kj} \rangle > z \},$$

где $z = \overline{1, Z}$ — количество исследуемых интервалов времени,

$t_{nj}; t_{kj}$ — время начала и конца одного интервала времени соответственно;

u — количество занимаемого ресурса (каналов) линии связи:

$$u = \frac{qx_{il}}{c_{ij}},$$

где c_{ij} — пропускная способность канала (линии) связи,

x_{il} — объем логической единицы информации,

q — количество каналов (линии) связи.

Структурно-логическая схема разработанного метода планирования передачи информации в системе связи с динамической топологией сети представлена на рис. 1. Метод подразделяется на следующие этапы.

1. На основе исходных данных о составе узлов ИС и состояния их движения осуществляется расчет взаимной видимости v_i на исследуемом интервале времени t .

2. По результатам расчета взаимной видимости для каждого v_i формируется множество интервалов существования линий связи с другими узлами ИС v_j : $L_i = \{ \langle t_{nj}; t_{kj} \rangle > z \}$.

3. Осуществляется выбор очередного $t_l = t_l + \Delta t$, когда в узлах $v_i \in V_n$ формируется очередной объем информации x_{il} , который необходимо передать в v_k .

4. Выбор очередного узла $v_i \in V_n$ и присвоение ему признака $f_i = 1$.

5. Выбор внутри дискрета времени t_l очередного дискрета времени t_r , в рамках которых осуществляется планирование передачи x_{il} . При $r=0$ $t_r = t_l$, а $\forall r > 0$ $t_r = t_r + \Delta t_r$, где $\Delta t_r = x_p / c_{ij}$.

6. Осуществляется перебор по всем v_i , для которых $f_i = 1$. Если $\forall v_i$ $f_i = 0$, тогда осуществляется переход к этапу 5, в противном случае к этапу 7.

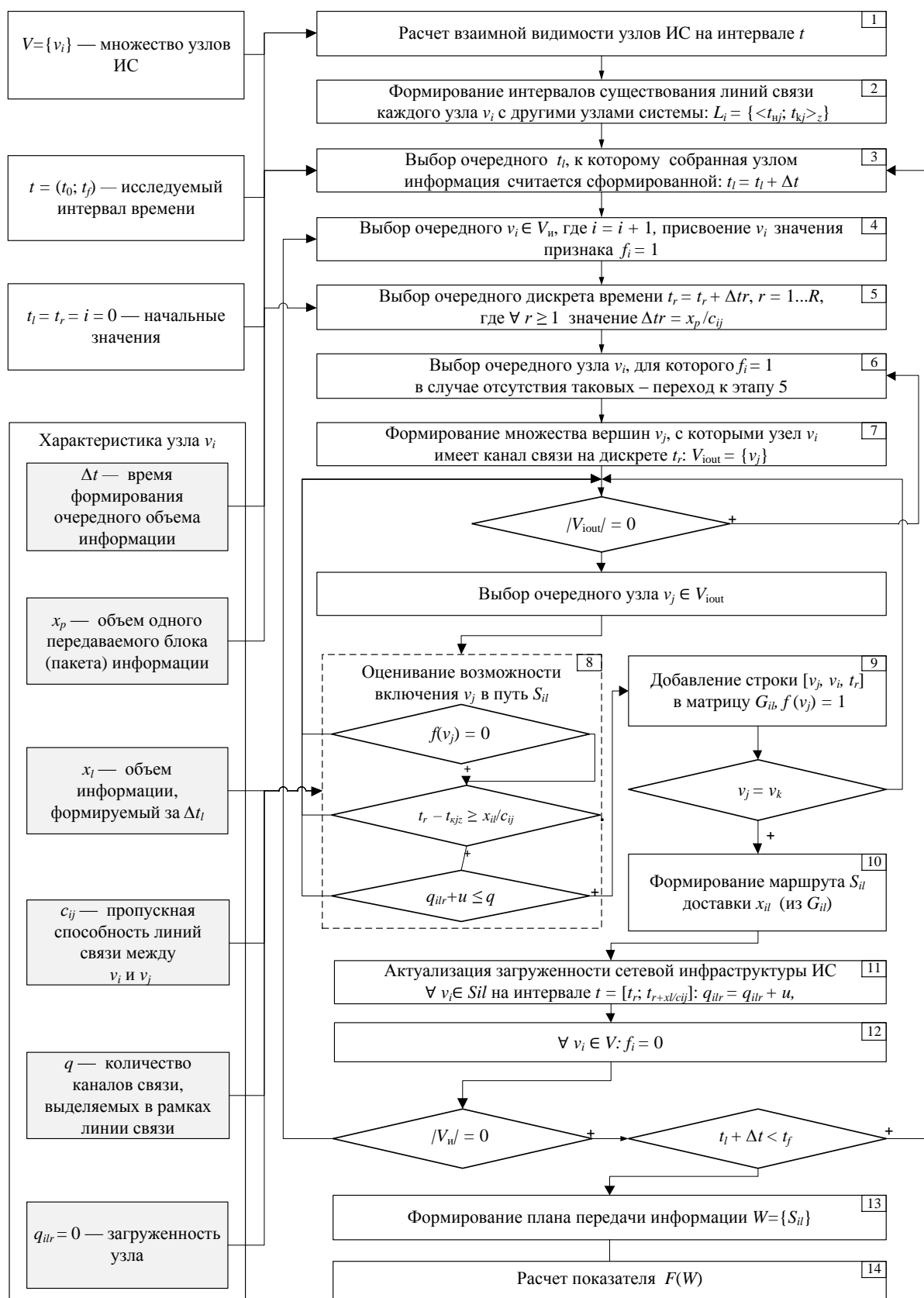


Рис. 1. Структурно-логическая схема метода планирования передачи информации в системе связи с динамической топологией сети

7. Для каждой $v_i | f_i = 1$ с использованием множества L_i определяется множество V_{iout} — узлов v_j , с которыми v_i связан на текущем дискрете времени t_r . Если такие вершины существуют, то осуществляется переход к этапу 8, в противном случае — к этапу 6.

8. Для каждой вершины $v_j \in V_{iout}$ оценивается возможность ее включения в маршрут передачи информации x_{il} . Для этого проверяется выполнение следующих условий:

- значение признака $f_j = 0$, т. е. узел еще не отобран для включения в маршрут передачи информации;
- остаточная длительность существования линии связи c_{ij} достаточна для передачи информации x_{il} : $t_r - t_{kz} \geq x_{il} / c_{ij}$;
- остаточная пропускная способность линии связи достаточна для передачи информации x_{il} : $q_{ilr} + u \leq q$.

Если одно из условий не выполняется, то выбирается очередной $v_j \in V_{iout}$ и для него проверяются условия данного этапа.

Если все три условия выполняются, то узел v_j считается отобранным для включения в маршрут передачи информации, $f_j = 1$.

Если все узлы v_j рассмотрены, т. е. $|V_{iout}| = 0$, осуществляется переход к этапу 6.

9. Для всех $v_j | f_j = 1$ в матрицу G_{il} добавляется строка $st_\beta = [v_{j\beta} \ v_{i\beta} \ t_{r\beta}]$, $\beta = 1, \dots, B$, содержащая номера узлов, которые, соответственно, получили и передали информацию, а также время начала передачи информации.

Далее осуществляется проверка условия, что узел v_j является конечным: $v_j = v_k$. Если $v_j \neq v_k$, то выбирается очередной $v_j \in V_{iout}$ для проверки на возможность включения в маршрут передачи информации. Если все узлы v_j рассмотрены, т. е. $|V_{iout}| = 0$, осуществляется переход к этапу 6. Если $v_j = v_k$, то осуществляется переход к этапу 10.

10. Формирование рационального маршрута S_{il} из матрицы G_{il} путем восстановления найденной последовательности передачи информации от узла v_i к v_k . Пример формирования S_{il} от узла v_1 к v_8 из соответствующей матрицы G_{il} (для условий отсутствия изменений в структуре сети) представлен на рис. 2.

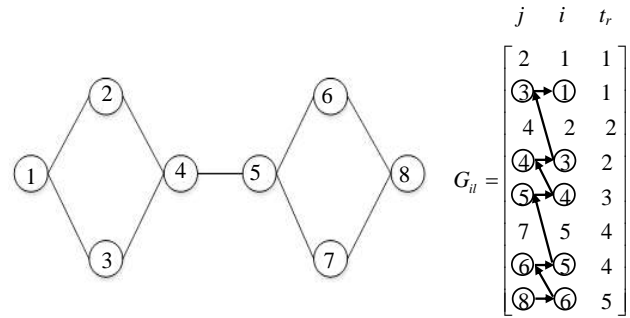


Рис. 2. Пример формирования маршрута передачи информации

11. Актуализация загруженности сети связи для найденного маршрута передачи информации. Для этого $\forall v_i \in S_{il}$ на интервале времени $t = [t_r; t_{r+x_i/c_{ij}}]$ (передачи x_{il}) изменяется загруженность по следующему правилу: $q_{ilr} = q_{ilr} + u$.

12. После актуализации загруженности сети связи значение признака отбора в маршрут передачи информации для всех узлов приравнивается к нулю, т. е. $\forall v_i \in V: f_i = 0$.

Далее осуществляется проверка условия, что среди множества узлов $v_i \in V_n$ существуют v_i , для которых маршруты передачи информации x_{il} еще не найдены. Если $|V_n| \neq 0$, то осуществляется переход к этапу 4.

В противном случае проверяется условие окончания интервала времени исследования: если значение $t_l + \Delta t \leq t_f$, то осуществляется переход к этапу 3, иначе — к этапу 13.

13. Формирование плана передачи информации в ИС $W = \{S_{il}\}$, который содержит маршруты передачи информации x_{il} , сформированные на каждом дискрете t_l узлами из V_n .

14. Расчет показателя оперативности передачи информации $F(W)$.

Результаты моделирования

Для апробации предложенного метода разработано программное средство, позволяющее автоматизировать процесс планирования передачи информации в системе связи с динамической топологией сети.

С использованием разработанного программного средства проведено моделирование процесса планирования передачи информации для различных вариантов исходных данных. Основной целью выполненных расчетов являлось сравнение значений показателя оперативности передачи информации,

получаемых с использованием разработанного метода, алгоритма FIFO и алгоритма Дейкстры [9].

В качестве исходных данных рассмотрена информационная система, которая имеет:

1) низкоорбитальную группировку КА, состоящую из 72 КА. Баллистическое построение КА: 3 равномерно разнесенных по широте орбитальных плоскости, в каждой плоскости расположено 24 КА, высота орбиты 1100 км, наклонение орбит 99° . Функционирование каждого КА заключается в сборе информации и передаче ее на наземные средства в зонах прямой видимости или через межспутниковые линии связи.

2) наземный комплекс приема информации включает восемь наземных средств, которые равномерно распределены с запада на восток по территории России на широте 55° с. ш.

3) средство обработки информации (СОИ), принадлежащее потребителю, имеет постоянную во времени линию связи со всеми наземными средствами;

4) диапазоны изменения характеристик целевой аппаратуры КА:

- длительность интервала формирования информации: $\Delta t = 10$ с;
- объем логической единицы собранной информации, Мб: $x_{il} \in [1; 100]$;
- объем одного пакета информации, Мб: $x_p \in [1; 10]$.

5) диапазон изменения характеристик линий связи:

- пропускная способность линии связи, Мб/с $c_{ij} \in [1; 100]$;
- количество каналов связи, организуемых в рамках линии связи, ед., $q = 10$.

В ходе проведения вычислительных экспериментов выполнено планирование передачи целевой информации от КА до потребителя, а также получены оценки оперативности передачи информации для различных вариантов приведенных ранее исходных данных.

Оценивание возможностей разработанного метода в сравнении с алгоритмом FIFO и алгоритмом Дейкстры проведено для задачи планирования передачи информации в системе, имеющей малые объемы формируемой целевой информации и одновременно высокие пропускную способность и канальность линий связи. Такая система позволяет оценить корректность учета динамики изменения топологии сети связи при планировании передачи информации для различных методов планирования.

Алгоритм Дейкстры в данной задаче применен для поиска кратчайших путей на участках посто-

янности структуры информационной системы, то есть на интервалах времени, когда линии связи между узлами сети и их характеристики не изменяются.

Алгоритм FIFO состоит в отыскании первого доступного маршрута, позволяющего передать заданный объем информации от источника к потребителю.

Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Представленные на рис. 3 оценки позволяют сделать вывод о том, что при заданных исходных данных разработанный метод в отличие от алгоритмов FIFO и Дейкстры позволяет обеспечить более высокий и стабильный уровень оперативности передачи информации, что обусловлено учетом динамических свойств сети связи.

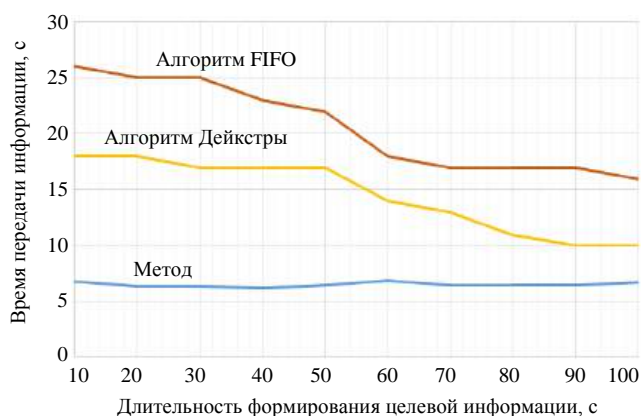


Рис. 3. Сравнительная характеристика применения методов планирования передачи информации при $x_{il} = x_p = 1$ Мб, $c_{ij} = 100$ Мб/с, $q = 10$

Необходимо также отметить, что среднее квадратическое отклонение получаемых значений оперативности доставки информации (по уровню 2σ) при использовании предлагаемого метода составило 3,18 секунды.

Далее для разработанного метода проведено исследование влияния количества средств в составе наземного комплекса приема информации на оперативность передачи информации от каждого КА до наземных средств. В ходе расчетов использовали конфигурации наземного комплекса, состоящего из N средств ($N = 1, \dots, 8$), которые равномерно разнесены по территории России на широте 55° с. ш. Соответствующие результаты представлены на рис. 4.

Представленные на рис. 4 оценки позволяют сделать вывод о том, что оперативность передачи информации в системе в значительной степени зависит от условий взаимной видимости подвижных источников информации стационарными средствами приема информации. При обеспечении связности сети время передачи информации опре-

деляется пропускной способностью линий связи в системе.

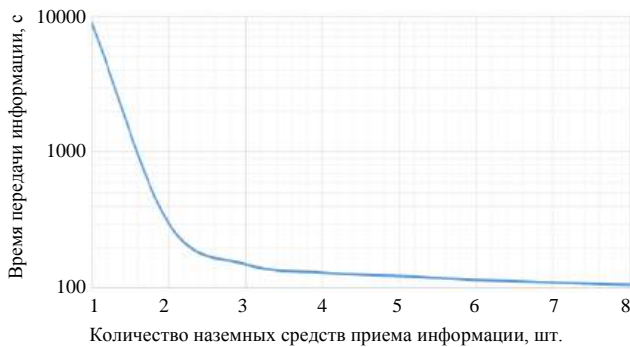


Рис. 4. Зависимость времени передачи информации от количества наземных средств приема
при $x_{il} = 100$ Мб, $x_p = 1$ Мб, $c_{ij} = 100$ Мб/с, $q = 10$

Кроме того, в рамках апробации разработанного метода получены оценки оперативности передачи информации в системе для таких исходных данных, когда пропускной способности линий связи источников информации недостаточно для передачи сформированного объема информации до момента поступления очередного объема собранной информации, т. е. $c_{ij} \leq x_{il} / \Delta t$ (рис. 5).

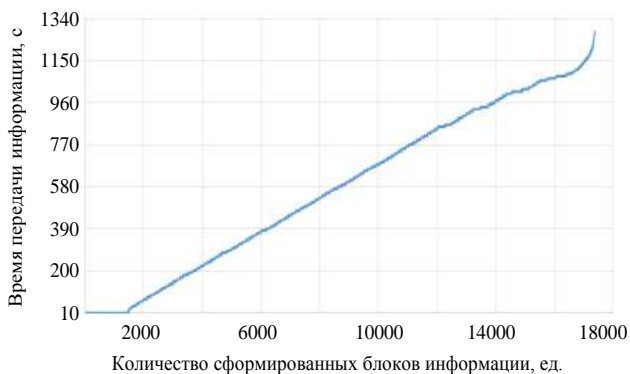


Рис. 5. Зависимость времени передачи информации от количества сформированной в системе информации
при $x_{il} = 100$ Мб, $x_p = 1$ Мб, $c_{ij} = 10$ Мб/с, $q = 1$, $\Delta t = 10$ с

Представленные на рис. 5 оценки позволяют сделать вывод о том, что по причине чрезмерной загрузки линий связи между КА передача информации в системе осуществляется только от КА, находящихся в зоне видимости наземных средств приема информации, а время доставки информации потребителю стремительно возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потюпкин А. Ю., Волков С. А., Тимофеев Ю. А. Перспективные сервисы многоспутниковых космических систем // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8. Вып. 1. С. 59—68.
2. Кочкаров А. А., Кочкаров Р. А., Малинецкий Г. Г. Некоторые аспекты динамической теории графов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55. № 9. С. 1623—1629.
3. Привалов А. Е., Хлебников С. Г. Имитационная модель управления проектами с использованием сетевого графика // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2016. № 2(130). С. 26—33.

Сравнительный анализ полученных в работе результатов позволяет сделать следующие выводы:

- использование разработанного метода позволяет сократить время передачи информации в системе в сравнении с альтернативными процедурами планирования, при этом конкретные значения прироста в оперативности определяются исходными данными рассматриваемой задачи;
- насыщение функции оперативности передачи информации в ИС наилучшим предельным значением для заданных пропускной способности и канальности линий связи происходит при условии обеспечения непрерывного наличия в зоне видимости ОГ КА хотя бы одного наземного средства приема информации;
- увеличение длительности (периодичности) формирования целевой информации КА приводит к снижению требуемого значения пропускной способности линий связи для обеспечения заданного уровня оперативности передачи информации в системе.

Заключение

Предложенный метод является развитием научно-методического аппарата планирования функционирования и оценивания эффективности сложных организационно-технических систем и может быть использован в задачах:

- планирования передачи информации в сложных информационных системах;
- оценивания возможностей информационных систем и технологий передачи информации;
- обоснования структуры динамических сетей связи в составе информационных систем;
- обоснования требований к характеристикам основных элементов динамических сетей связи в составе информационных систем.

Разработанный метод позволяет формировать рациональные планы передачи информации от источников информации к потребителю в ИС, имеющей в своей структуре систему связи с динамической топологией сети. Применение метода обеспечивает повышение уровня оперативности передачи информации в ИС за счет адаптации и использования алгоритма обхода графа в ширину для решения задачи поиска кратчайших путей передачи информации в динамической постановке.

4. Емеличев В. А., Мельников О. И., Сарванов В. И., Тышкевич Р. И. Лекции по теории графов. — М.: Наука, 1990. — 392 с.
5. Ford L. R., Fulkerson D. R. Constructing maximal dynamic flows from static flows // Operations Research. 1958. V. 6. Is. 3. P. 419—433.
6. Ураков А. Р., Тимеряев Т. В. Алгоритм решения динамической задачи поиска кратчайших расстояний в графе // Управление большими системами. 2017. Вып. 65. С. 60—86.
7. Скороходов В. А., Свиридкин Д. О. Потоки в сильно регулярных периодических динамических ресурсных сетях // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2021. Т. 31. Вып. 3. С. 458—470.
8. Москвин Б. В., Колпин М. А. Комбинированные модели планирования передачи информации в условиях структурной динамики системы управления: сб. труд. II Всеросс. науч.-техн. конф. "Системы управления, обработки информации и принятия решений", 2010. С. 88—91.
9. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. Изд. 2. — М.: "Вильямс", 2005. — 893 с.

METHOD FOR SCHEDULING THE TRANSMISSION OF INFORMATION IN A COMMUNICATION SYSTEM WITH DYNAMIC NETWORK TOPOLOGY BASED ON A GRAPH BYPASS IN WIDTH

M. A. Kolpin, P. A. Protsenko, S. G. Khlebnikov

Military Space Academy named after A. F. Mozhayskiy, St. Petersburg, Russia

The article proposes a method of scheduling the transmission of information in a communication system with a dynamic network topology, based on a modification of the known algorithm for bypassing a graph in width. A modification of the algorithm for solving the dynamic problem consists in the fact that on each time discrete for each vertex of the graph selected for inclusion in the information transmission route, the possibility of transmitting information to other vertices is estimated, taking into account the existing restrictions on the time of existence and the weight of the edges connecting them. The method allows you to find in the dynamic graph such routes of information transfer from the source vertices to the drain vertex, which provide a minimum time of information delivery.

Keywords: dynamic graph, information system, capacity, communication network, route, speed.

Bibliography — 9 references.

Received May 17, 2023

УДК 004.89:658.5.011

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_11

EDN: GCKPCS

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПОИСКОВЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

^{1, 2} Д. К. Щеглов, канд. техн. наук; ^{1, 2} А. Г. Сайбель, д-р техн. наук;

¹ Д. А. Фёдоров, канд. техн. наук

¹ АО «Северо-западный региональный центр Концерн ВКО «Алмаз—Антей» — Обуховский завод», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Россия

Изложены результаты тестирования систем разговорного искусственного интеллекта (ИИ) ChatGPT для проведения поисковых научных исследований. Рассмотрены особенности формализации вербального взаимодействия с ChatGPT. Показаны результаты анализа возможности автоматизации исследования тенденций развития теорий организации проектно-конструкторских работ и промышленного производства. Представлены методические рекомендации по проведению поисковых исследований с применением систем рассматриваемого класса.

Ключевые слова: искусственный интеллект, большие языковые модели, поисковые исследования, ChatGPT, организация производства, прогноз развития.

"Искусственный интеллект не заменит человека, но человек, использующий искусственный интеллект, заменит того, кто не использует его".

*Фарид Закария,
американский журналист и автор книг*

Технологии ИИ нашли широкое применение в науке, образовании, промышленном производстве, искусстве и многих других сферах жизнедеятельности человека. При этом к наиболее перспективным и обсуждаемым в направлениях развития данных технологий следует отнести, так называемый "разговорный" ИИ, в основе которого лежат большие языковые модели (*Large Language Model* — LLM). Специалисты различных профессий, таких как научные работники, программисты,

журналисты и др. активно используют системы разговорного ИИ для повышения оперативности своей работы [1, 2]. Развитию LLM-моделей посвящены, научные публикации [3, 4]. Аналитики утверждают, что в ближайшей перспективе именно системы разговорного ИИ окажут существенное влияние на развитие цифрового общества [2, 5].

Наиболее острые дискуссии вызывает применение разговорного ИИ в научно-исследовательской практике: с одной стороны, это существенно сокращает время, затрачиваемое на анализ и обобщение информации в процессе проведения научных исследований; с другой стороны, — научные работники (исследователи), использующие системы разговорного ИИ, рискуют быть введенными в заблуждение ложной или предвзятой информацией. Это связано с тем, что в отличие от поисковых систем, предоставляющих множество информационных материалов на запрос исследователя, из которых он может выбрать наиболее качественные, системы разговорного ИИ выдают единственный ответ, базирующийся как на истинных, так и на ложных или устаревших данных [5]. При этом для

Щеглов Дмитрий Константинович, доцент, начальник научно-исследовательского центра, заведующий базовой кафедрой "Средства ВКО и ПВО".

E-mail: _dk@bk.ru

Сайбель Алексей Геннадиевич, доцент, профессор научно-образовательного центра, профессор кафедры "Радиоэлектронные системы управления".

E-mail: saybel_ag@mail.ru

Фёдоров Дмитрий Александрович, начальник лаборатории динамики и прочности.

E-mail: telumendil@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 марта 2023 г.

© Щеглов Д. К., Сайбель А. Г., Фёдоров Д. А., 2023

большинства систем разговорного ИИ базовые обучающие наборы и LLM-модели, как правило, не являются общедоступными, поскольку составляют "ноу-хау" компаний-разработчиков. Это затрудняет выявление происхождения или некорректности данных в обучающих наборах и ошибок в алгоритмах.

Разумеется, системы разговорного ИИ в процессе проведения и оформления материалов поисковых исследований можно применять по-разному. В некоторых случаях они могут генерировать значительные части рукописи в ответ на запросы исследователя [6]. При этом остается открытым вопрос принадлежности прав на результат интеллектуальной деятельности, впрочем, как и ответственности компании-разработчика за его достоверность.

Вопросы и противоречия, связанные с использованием при проведении поисковых научных исследований систем разговорного ИИ, включая базовые обучающие наборы и LLM, по всей видимости, не разрешатся в ближайшее время [2, 6]. Поэтому на текущем этапе развития технологий разговорного ИИ актуальным является, как минимум, обоснование возможности их применения для различных предметных областей, оценки надежности и достоверности получаемых результатов.

Одной из самых популярных среди систем разговорного ИИ является ChatGPT, разработанный компанией OpenAI (Сан-Франциско, Калифорния) [5, 7]. В основе ChatGPT лежат модели машинного обучения нейронной сети с генеративным предварительно обученным преобразователем (на период проведения данного исследования — модели третьего поколения GPT-3 и GPT-3.5 [3, 8]). Эти модели реализуют методы обучения с подкреплением на основе человеческих предпочтений и трансферного обучения для обеспечения более естественной коммуникации чат-бота с пользователями.

ChatGPT — это бесплатная, простая в использовании и постоянно развивающаяся диалоговая система, которая автономно учится на данных и может создавать сложные и, казалось бы, интеллектуальные записи после обучения на массивном наборе текстовых данных. Более того, это одна из первых систем, которая может убедительно общаться с пользователями на английском и других языках по широкому кругу тем. Многие респонденты считают, что ChatGPT успешно справляется с задачами по созданию и помощи в улучшении текстов, разработке программных кодов, обобщению текстов, классификации контента, ответу на вопросы, переводу текстов (включая языки программирования) [9]. При этом актуальным является

вопрос оценки качества реализации этих функций в контексте проведения поисковых научных исследований. В рамках данной работы, в силу практических интересов авторов, предлагается исследование возможности использования ChatGPT для прогнозирования тенденций развития теории организации производства.

Постановка задачи исследования

Искусственный интеллект нужен для автоматизации процессов, требующих применения интеллекта. В такой постановке вопроса вынесенные в эпиграф слова становятся научным прогнозом.

Обсуждение результатов тестирования ИИ является популярным трендом, привлекая внимание широкой аудитории пользователей. Большая часть обсуждаемых вопросов относится к развлечениям, удовлетворению любопытства и попыткам учащихся заставить ИИ работать вместо себя [10]. Однако вопросу о том, насколько ИИ может усилить возможности человека, занятого интеллектуальной деятельностью, уделяется гораздо меньше внимания.

Наверное, применение технического устройства для разгадывания кроссвордов имеет смысл только в контексте соревнований по разгадыванию кроссвордов, цель которого заключается не в разгадывании кроссворда как такового, а в победе над другими участниками. Приведенный пример показывает, что необходимо выявить те аспекты интеллектуальной деятельности, которые можно поручить машине, что должно привести как минимум к одному из следующих эффектов: улучшению качества результата, сокращению времени его получения или снижению затрат на достижение желаемого результата.

Технологии ИИ позволяют настраивать машины на решение конкретных задач, в том числе на получение ответов на интересующие вопросы. Очевидно, что часть этих вопросов связана с эмоциональной составляющей человека, и получение ответов на них достаточно сложно автоматизировать. В то же время, другая часть вопросов, связанная с умственной деятельностью, в которой преобладает четкая логика и измеримый здравый смысл, может быть решена при помощи ИИ.

Кроме того, следует отметить, что термин "поиск ответа" может иметь различные трактовки в зависимости от контекста. Если вопрос имеет ответ (например, в справочниках, книгах и других источниках), который нужно найти, то поисковая машина позволяет автоматизировать и ускорить процесс его выявления. В случае выполнения научных исследований, поиск ответа на постав-

ленный вопрос может потребовать его формирования, генерации и синтеза, поскольку до проведения исследования ответ может не существовать или существовать только в виде разрозненных элементов.

Целью исследования авторов является научное обоснование принципиальной возможности использования системы разговорного ИИ для повышения эффективности проведения поисковых научных исследований.

Методика проведения исследования

Методика проведения исследования состоит из нескольких этапов.

Этап 1. Анализ особенностей формулирования запросов системе ChatGPT. Очевидно, что результат работы LLM-модели системы разговорного ИИ в значительной степени зависит от синтаксиса и фразеологии используемого языка, полноты и точности задаваемых вопросов, алгоритма диалогового взаимодействия пользователя и системы. Особенности формулирования запросов нейронной сети активно обсуждаются в Интернет-сообществе. В частности, авторы [11, 12] предлагают воспользоваться следующими рекомендациями по организации диалогового взаимодействия с системой ChatGPT:

- определить роль (например, *"Я хочу, чтобы вы выступили в роли исследователя"*, *"... эксперта"* и т. п.);
- сформулировать задачу (например, *"Вы предложите ..."*, *"Вам предстоит ответить ..."*, *"Ваша задача ..."* и т. п.);
- описать план выполнения задачи (например, *"Выведите ... и дождитесь моего ответа"*, *"Сначала опишите ..., а затем ..."* и т. п.);
- задать контекст (например, *"Целевой аудиторией является..."*, *"Вы должны использовать знания в области ..."*, *"... в условиях ресурсных ограничений"*, *"... в прошлом веке"* и т. п.);
- задать формат ответа (например, *"Разбей результат на абзацы"*, *"Оформи в виде нумерованного списка"*, *"... без использования аббревиатур"* и т. п.);
- установить правила ответа (например, *"Ответ необходимо пояснить"*, *"Ответить нужно "да" или "нет"*, *"... кратко без пояснений"*, *"... без использования специальной терминологии"* и т. п.).

Этап 2. Верификация базовых обучающих наборов и LLM-модели ChatGPT на контрольных

вопросах. Под верификацией, будем понимать подтверждение достоверности результатов поисковых запросов, выдаваемых системой разговорного ИИ, путем их сопоставления с результатами интеллектуальной деятельности коллектива людей. В целях проведения верификации предлагается сравнить результаты поисковых исследований, опубликованных в монографии [13], с результатами работы ChatGPT. Монография содержит результаты работы творческого коллектива авторов по анализу и обобщению актуальных социально-экономических вопросов внедрения ИИ в сферу производства и государственного управления. В процессе проведения информационного поиска по тематике исследования творческим коллективом был проведен анализ общедоступных данных и выделен 161 релевантный источник информации. В качестве верификационного базиса будем использовать ответы авторов монографии на следующие вопросы:

- Какие официальные (нормативные) определения ИИ существуют в РФ и в мире.
- Какие проблемы, по мнению экспертов, препятствуют активному внедрению ИИ в РФ / в мире.
- Какие профессии, по существующим прогнозам, вскоре исчезнут / появятся, в связи с широким внедрением ИИ.
- Какие проблемы, по мнению экспертов, будут затруднять процесс переквалификации работников в связи с широким внедрением ИИ в РФ / в мире.
- Какие проблемы нормативно-правового регулирования, по мнению экспертов, затрудняют широкое внедрение ИИ.
- Какие новые криминальные угрозы прогнозируют эксперты в связи с широким внедрением ИИ.
- Какие этические проблемы выделяют эксперты в связи с перспективой широкого внедрения ИИ.
- Как, по мнению экспертов, повлияет широкое внедрение ИИ на мировую экономику / экономику РФ.
- Как, по мнению экспертов, широкое внедрение ИИ повлияет на социальную сферу государственного управления.
- Какие прогнозы дают эксперты в отношении развития систем вооружений в связи с широким внедрением ИИ.

Следует отметить, что дополнительно для верификации базового обучающего набора системы разговорного ИИ можно использовать комплекс вопросов, связанных с достоверными событиями, произошедшими в прошлом.

Этап 3. Формирование запросов ChatGPT о тенденциях развития промышленного производства. В целях проведения поисковых исследований в области развития современной теории организации проектно-конструкторских работ и промышленного производства были сформулированы следующие основные вопросы:

- Какие научные проблемы существуют в настоящее время / возникнут в будущем в области организации проектно-конструкторских работ.
- Какие научные проблемы существуют в настоящее время / возникнут в будущем в области организации промышленного производства.
- Какие противоречия существуют в настоящее время в теории организации проектно-конструкторских работ / промышленного производства.

Далее системе разговорного ИИ ChatGPT предлагается выступить в роли ученого (исследователя) — разработчика междисциплинарных теорий организации проектно-конструкторских работ и промышленного производства. Системе будут сформулированы вопросы по цели этих теорий, их основным положениям, актуальности, научным и практическим результатам, возможной области применения и т.д. Анализ и обобщение полученных результатов будет выполнен авторами.

Этап 4. Анализ и обобщение полученных результатов. В рамках проведения предлагаемого исследования первым этапом анализа результатов ответов системы ChatGPT на запросы пользователей интересно проверить существует ли наличие заимствований посредством "Антиплагиат.ру" [14]. Далее проводится анализ ответов в контексте их полезности для формирования тенденций развития теорий организации проектно-конструкторских работ и промышленного производства, а также целесообразности и эффективности применения системы разговорного ИИ в процессе проведения поисковых научных исследований.

Результаты проведенного исследования

Далее в соответствии с предложенной методикой будут рассмотрены результаты верификации системы разговорного ИИ ChatGPT и проведенного на ее основе исследования тенденций развития современной теории организации проектно-конструкторских работ и промышленного производства.

В результате анализа всей совокупности ответов ChatGPT на портале "Антиплагиат.ру" [14] их оригинальность составила 98,01 %, совпадения 1,73 %, цитирование 0,26 %. Это связано с тем, что

LLM-модель ChatGPT использует различные техники генерации текста, такие как случайные выборки, многократное обучение и генерацию на основе ранее сгенерированных текстов. Кроме того, перед публикацией все ответы проходят автоматические проверки на орфографию и грамматику, на уникальность, на соответствие теме и заданному вопросу, на корректность и точность, на этичность.

Анализ ответов ChatGPT на контрольные верификационные вопросы позволяет заключить, что общий уровень выданной информации, ее объем и достоверность в целом соответствуют той информации, которую сформировал коллектив авторов монографии [13]. При этом времени, затраченного системой разговорного ИИ ChatGPT на поиск информации и формулировку ответов, потребовалось на порядок меньше, чем экспертам — несколько минут и несколько часов соответственно.

На вопрос об определении искусственного интеллекта ChatGPT правильно ответил, что в России на данный момент отсутствует официальное определение понятия ИИ и привел ряд определений из отечественных и зарубежных законодательных и нормативных документов. Также было справедливо отмечено, что все они отражают различные аспекты ИИ, а само определение по-прежнему является объектом дискуссии в научном сообществе и может изменяться с развитием технологий и появлением новых подходов к его изучению.

Отвечая на вопрос о проблемах, препятствующих активному внедрению ИИ, ChatGPT правильно выделил недостаток кадров, недостаточную финансовую поддержку, низкую осведомленность промышленности и бизнеса о возможностях ИИ. Также совершенно точно было отмечено, что для России особо актуальной является проблема отставания от мировых лидеров в области ИИ, тогда как для мира в целом важными являются также вопросы этики, безопасности и отсутствия стандартов.

Основной список профессий, которые, по мнению ChatGPT, вскоре исчезнут в связи с широким внедрением ИИ, также совпадает с выводами авторов монографии [13]. Среди этих профессий кассиры и банковские служащие, водители, секретари и ассистенты, рабочие на производстве, журналисты и писатели, бухгалтеры и аудиторы, телемаркетологи и операторы колл-центров, переводчики, оценщики недвижимости. Характерно, что ChatGPT не включил в этот список художников-иллюстраторов, поскольку его базы данных на момент формулировки запроса ограничивались информацией на конец 2021 года, а нейронные сети, создающие реалистичные изображения по

описанию пользователя, получили широкую популярность только с конца 2022 года.

Одновременно с этим ChatGPT прогнозирует появление множества профессий, связанных с анализом данных, полученных с помощью специализированных систем ИИ, а также связанных с обучением, настройкой и поддержкой функционирования систем ИИ. Данный перечень также совпадает с мнением авторов монографии [13], но одновременно с этим — на этом перечне явно и основывается. ChatGPT не сделал никаких новых прогнозов о профессиях будущего, что говорит об ограниченности его алгоритмов рамками лишь той информации, которую ранее сформировали пользователи-люди. Этот результат свидетельствует о недостаточной надежности прогнозов ChatGPT, поскольку они опираются на мнения людей, а не на расчеты или машинную логику, иными словами, такие прогнозы люди способны делать и без использования ИИ.

Среди проблемных вопросов, затрудняющих перекалфикацию работников в связи с широким внедрением ИИ, ChatGPT справедливо выделил недостаток специалистов по созданию, обучению и управлению системами ИИ, неготовность системы образования принять требуемое число обучающихся, общее нежелание людей обучаться новым навыкам, нехватку финансовых и временных ресурсов, а также отсутствие правовой и этической регламентации. При этом в рамках проблематики нормативно-правового регулирования отмечена недостаточная ясность и согласованность законодательства, трудности учета характерных особенностей для различных областей деятельности человека, неоднозначность с установлением ответственности, когда вопрос касается систем ИИ, а также философскую проблематику учета различных этических норм и взглядов.

Перечень этических проблем, которые перечислил ChatGPT в связи с внедрением ИИ, оказался довольно обширным и охватил практически все вопросы, дискуссии о которых сейчас идут в научном, инженерном и юридическом сообществе. Среди этих проблем нужно отдельно выделить возможность неявно запрограммированной дискриминации, нарушение приватности и потенциальные угрозы безопасности, невозможность однозначного определения ответственности в силу того, что неясно каким правовым статусом должен обладать ИИ; программируемую социальную и экономическую напряженность, большую вероятность использования ИИ для разработки оружия и иных средств поражения людей, безграничные возможности для манипуляции информацией, отсутствие прозрачности принятия решений и заведомую ограниченность ИИ. В данном случае так-

же характерно, что ChatGPT не перечислил ни одной новой этической проблемы внедрения ИИ, кроме тех, что уже были сформулированы экспертным сообществом. Отсюда можно сделать вывод о том, что ChatGPT не удалось спрогнозировать новые этические проблемы, которые могут возникнуть в связи с дальнейшим развитием технологий ИИ.

Существенно лучше ChatGPT отвечает на вопросы о перспективных новых криминальных угрозах, которые потенциально может нести повсеместное внедрение ИИ. Среди таких угроз упомянуты кибератаки, фальсификация данных и атаки одного ИИ на системы другого ИИ, создание новых мошеннических схем, нарушение правил приватности и распространение нелегального контента. Последний аспект не был выделен авторами монографии [13], что, впрочем, можно объяснить низкой актуальностью данного вида преступлений с точки зрения российских экспертов. С другой стороны, ChatGPT не выделил такой важный вид преступлений, как возможность незаконной слежки за людьми с помощью анализа большого числа электронных данных, которые попадают в сеть через личные гаджеты, банковские терминалы, электронные сети и городские камеры различных систем видеонаблюдения.

Ответ ChatGPT на вопрос о влиянии ИИ на экономику оказался достаточно абстрактным и включал в себя развитие автоматизации, увеличение производительности, появление новых возможностей для бизнеса в плане оптимизации бизнес-моделей и создания новых продуктов или услуг, развитие новых отраслей промышленности, переход к "экономике знаний" и сокращение числа рабочих мест. Все эти ответы говорят в первую очередь о том, что эксперты крайне плохо представляют себе экономику будущего и не могут дать никаких определенных достоверных прогнозов, которые бы не подвергались глубокой критике. По этой причине ChatGPT просто повторяет однообразные малосодержательные тезисы.

Несколько лучше ChatGPT дает ответы на вопросы о влиянии ИИ на социальную сферу государственного управления. В этом отношении имеются некоторые удачные наработки и решения в целом ряде стран мира, в том числе и в России, поэтому ChatGPT вполне обосновано прогнозирует улучшение качества государственных услуг, оптимизацию процессов управления, повышение прозрачности принятия государственных решений и снижение затрат на органы государственного управления.

Наиболее важным представляется ответ ChatGPT на вопрос в отношении направления развития систем вооружений в связи с широким

внедрением ИИ. Здесь прогнозируется широкое внедрение автономных оружейных систем, увеличение скорости и точности работы систем вооружений, снижение количества военнослужащих на поле боя, рост внимания к кибербезопасности, изменение форм военной стратегии и стремительное развитие беспилотных технологий. Отдельно выделяется такая серьезная проблема, как перспективная гонка ИИ-вооружений, которая способна привести к непредсказуемым последствиям для отдельных стран и мира в целом. Уже сегодня можно сказать, что проблема кибербезопасности действительно оказалась чрезвычайно актуальной, а все прогнозы экспертов об использовании "умного" ИИ-оружия на поле боя пока что не подтверждаются на практике. Зато в полной мере подтвердилась важность использования беспилотных летательных аппаратов.

Следует подчеркнуть, что ответы, данные ChatGPT, совпадают с информацией, представленной в работах [15, 16].

Также важно отметить, что ответы ChatGPT на вопросы пользователей, задаваемые на русском и английском языках, практически не отличаются. Это связано с тем, что LLM-модель ChatGPT использует методы машинного перевода и автоматического анализа языка применяя их ко всем текстам, имеющимся в его базовом обучающем наборе.

Таким образом, проведенная верификация базовых обучающих наборов и LLM-модели ChatGPT показала, что система разговорного ИИ повторила за экспертами все их прогнозы и ошиблась по всем вопросам, где ошиблись эксперты-люди.

Проведенная верификация показала, что при составлении прогноза развития современной теории организации проектно-конструкторских работ и промышленного производства на основе информации, собранной ChatGPT, необходимо учитывать ряд ограничений, таких, как [9]:

- отсутствие информации о последних событиях (набор данных для обучения актуализирован на конец 2021 года);
- отсутствие информации об используемых при формировании ответов источниках данных и их достоверности;
- отсутствие возможности обучения нейронной сети на пользовательских базах знаний;
- несовершенство механизмов выполнения математических операций.

С целью проанализировать качество проведения научных прогнозов с использованием ChatGPT было проведено исследование встроенного в него математического модуля. Исходные данные для прогнозирования были сформированы

на основе запроса ChatGPT значений индексов промышленного производства США, Китая и России за 2010—2021 гг. Затем был сформирован запрос о построении полиномиальных регрессионных зависимостей, вычислении прогнозных показателей на 2022—2024 гг. и доверительных интервалов. В процессе диалога с ChatGPT было установлено, что система в ряде случаев неправильно определила коэффициенты регрессионных зависимостей, что подтвердило несовершенство механизмов выполнения математических операций.

Также в процессе проведения исследования было установлено, что в некоторых случаях LLM-модель может генерировать несуществующие факты и события, которые не происходили в прошлом либо настоящем. Например, на вопрос о действующих мерах поддержки проведения научных исследований в России ChatGPT привел ряд несуществующих государственных программ. При этом название некоторых из них (*молодой научный кадр, аспирантский кредит* и т. п.) представляли собой синтез нескольких реально действующих, но несвязанных друг с другом программ.

В соответствии с целью и методикой проведения исследования ChatGPT была сформулирована серия вопросов о существующих и перспективных проблемах, противоречиях и направлениях дальнейшего развития теорий организации проектно-конструкторских работ и промышленного производства. Далее будут приведены наиболее интересные ответы ChatGPT на эти вопросы.

Среди наиболее актуальных проблемных вопросов, связанных с *организацией проектно-конструкторских работ*, ChatGPT были выделены: управление знаниями, рисками, командами, а также интеграция проектно-конструкторских работ с другими производственными процессами. К перспективным проблемным вопросам ChatGPT отнес развитие методологии проектирования, разработку интеллектуальных систем поддержки принятия решений, совершенствование технологий быстрого прототипирования, совместной работы проектировщиков, управления проектами. Дополнительно была обозначена актуальность разработки новых методов валидации и верификации цифровых прототипов и двойников, развитие методов управления изменениями в проектах, а также технологий виртуальной и дополненной реальности.

Среди наиболее актуальных проблемных вопросов, связанных с *организацией промышленного производства*, ChatGPT выделил: управление производственными рисками и цепочками поставок, энергосбережение, применение цифровых технологий, робототехника и автоматизация, интегра-

ция производственных процессов, разработка инновационных материалов, машинное обучение и анализ данных, управление качеством продукции, утилизация и переработка отходов, а также разработка и внедрение новых форм организации производства. К перспективным проблемным вопросам ChatGPT отнес создание гибких и адаптивных производственных систем, разработку новых методов управления производством, развитие цифровых технологий и Интернета вещей, разработку экологически чистых технологий, разработку методов работы с большими объемами данных.

ChatGPT указал на несколько противоречий в теории организации проектно-конструкторских работ, таких как противоречия между инновациями и стандартизацией, личными качествами участников проекта и их ролями в команде, а также возможные перспективные противоречия между традиционными методами и новыми технологиями, потребностями заказчика и возможностями технологий.

В свою очередь, в современной теории организации промышленного производства ChatGPT выделил противоречия между стандартизацией и гибкостью, централизацией и децентрализацией, автоматизацией и занятостью, конкуренцией и сотрудничеством, ценой и качеством продукции, стабильностью и изменчивостью. В будущем ChatGPT спрогнозировал усиление противоречий между автоматизацией и занятостью, цифровизацией и безопасностью, цифровизацией и требованиями к персоналу, а также между линейной и гибкой структурами управления.

ChatGPT прогнозирует, что теория организации проектно-конструкторских работ будет развиваться в рамках нескольких научных направлений, включая методы управления проектами, использование информационных технологий, управление качеством, создание новых конструкционных материалов, командообразование и управление персоналом.

В то же время, теория организации производства, по прогнозу ChatGPT, будет развиваться в направлениях автоматизации и цифровизации, управления качеством, логистики и управления цепями поставок, экологической безопасности и управления человеческими ресурсами. Эти направления будут играть важную роль в развитии производственных процессов и создании эффективной системы управления промышленным предприятием.

На основании анализа совокупности приведенных ответов можно сделать вывод, что ChatGPT в целом справился с задачей идентификации и классификации наиболее актуальных проблемных вопросов, противоречий и перспектив развития те-

рий организации проектно-конструкторских работ и промышленного производства. Однако каких-либо принципиально новых прорывных идей, не сформулированных ранее экспертами-людьми, ChatGPT в рамках проведенного авторами исследования, к сожалению, не предложил.

Далее в качестве направления дальнейших поисковых исследований были определены два теоретических аспекта, представляющих интерес для авторов статьи: организация производства и организации проектно-конструкторских работ. В качестве формы взаимодействия с ИИ выбрано интервью, в качестве исходных данных для которого определена роль ИИ как ученого — автора новых междисциплинарных теорий.

В результате проведенного исследования, *междисциплинарную теорию организации производства* ChatGPT определил, как комплексный подход к управлению производством, который учитывает технические, экономические, социальные и экологические аспекты, а также взаимодействие между ними, а *междисциплинарную теорию организации проектно-конструкторских работ*, как комплексный подход к организации проектно-конструкторских работ, который объединяет передовые методы и технологии, управление рисками, качеством и ресурсами, мультидисциплинарность и стратегическое управление.

Далее ChatGPT в двух сессиях успешно ответил на вопросы об основных положениях разработанных теорий, актуальности проведенного исследования, объекте и предмете, цели работы, научном и практическом результатах, применяемых методах исследования, а также планируемых областях применения разработанных теорий.

Полученные ответы были развернутыми, содержательными, непротиворечивыми.

На уровне эмоционального восприятия можно констатировать, что если рассматривать выполненное исследование как тест Тьюринга [17], то ИИ успешно его проходит. Обладая обширным опытом преподавательской деятельности, авторы согласились, что если бы на вопросы так отвечал аспирант, то результаты отсчетного мероприятия были бы положительными.

Более детальный разбор ответов показывает, что качество формулировок выше, чем смысловое наполнение. При уточняющих вопросах ИИ повторяется, используя незначительно скорректированные формулировки.

Вместе с тем, следует отметить, что ряд предложенных доводов оказался нетривиальным, это позволяет утверждать, что использование ИИ в качестве партнера в процессе мозгового штурма может добавить широты спектру вовлекаемых в анализ вопросов и положений.

Таким образом, было установлено, что ChatGPT может стать незаменимым помощником аспирантам и докторантам в постановке задач диссертационных исследований.

Выводы и рекомендации

Рассмотрена возможность применения технологий ИИ для повышения эффективности поисковых научных исследований. Было установлено, что системы разговорного ИИ имеют значительный потенциал для ускорения поиска информации и предоставления структурированной информации на запросы исследователей, что может существенно повысить качество исследований и сократить временные затраты на их проведение. Такие системы могут значительно ускорить процесс поиска необходимых материалов и снизить вероятность упущения важной информации. Кроме того, использование систем разговорного ИИ может помочь исследователям обнаруживать новые тенденции и зависимости, которые могут быть упущены при ручном анализе данных, что может способствовать появлению новых идей и открытий в науке.

Стремительное развитие систем разговорного ИИ уже в ближайшем будущем сделает их незаменимым инструментом для научных работников, позволяющим значительно ускорить и улучшить качество научных исследований. Однако проведенное исследование показало, что наряду с неоспоримыми достоинствами таких систем они имеют ряд существенных недостатков и ограничений. В частности, к ним относится неспособность эффективно работать с количественными оценками, что связано с трудностями в систематизации и обработке статистических данных, а также с ограниченностью способностей системы к построению и представлению количественных прогнозов. Кроме того, системы разговорного ИИ не всегда предоставляют корректные ссылки на используемые для подготовки текстов материалы, что затрудняет проверку и подтверждение полученных данных.

С учетом выявленных достоинств, недостатков и ограничений систем разговорного ИИ был сформулирован ряд рекомендаций по повышению результативности их использования в поисковых научных исследованиях:

- При формировании запросов системе разговорного ИИ целесообразно:
 - точно и однозначно формулировать запросы системе, используя ключевые слова и фразы, связанные темой исследования;

- указывать наиболее важные параметры и ограничения для уточнения запроса;
 - использовать синонимы и семантически близкие термины для улучшения результатов поиска;
 - проверять полученные результаты запросов и уточнять запрос при необходимости;
 - При построении системой разговорного ИИ прогнозов и корректных количественных оценок целесообразно:
 - тщательно проверить и систематизировать входные данные, используемые для построения прогнозов;
 - не полагаться только на рекомендации системы, анализировать и проверить полученные результаты;
 - правильно интерпретировать значения количественных оценок, выдаваемых системой;
 - использовать графические средства визуализации и интерпретации полученных результатов для обнаружения возможных ошибок;
 - При проведении анализа и обобщения полученных от системы разговорного ИИ результатов запросов целесообразно:
 - оценивать качество и полноту полученной информации, проверять данные на достоверность;
 - проводить анализ результатов в контексте поставленной цели и задач исследования;
 - выделять наиболее значимые и интересные факты и выводы при обобщении и систематизации полученной информации;
 - сопоставлять полученные результаты с известными исследованиями и предыдущими запросами;
 - учитывать ограничения и недостатки системы при анализе полученных результатов.
- Таким образом, применение систем разговорного ИИ в поисковых научных исследованиях может быть эффективным инструментом, но только при сочетании их с традиционными методами исследования и тщательной проверкой полученных результатов.
- 14 марта 2023 г. компания OpenAI анонсировала новую мультимодальную модель GPT-4, которую можно использовать для решения более широкого спектра задач, таких как распознавание речи, обработка изображений и видео, автоматический перевод и многое другое.
- Авторы уверены, что эта модель станет для них предметом новых не менее интересных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. На какие профессии повлияет ChatGPT. Хабр. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/708270/> (дата обращения: 13.02.2023).
2. Van Dis E. A. M., Bollen J., van Rooij R., Zuidema W., Bockting C. L. ChatGPT: five priorities for research // Nature. 2023. V. 614. P. 224—226. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00288-7> (дата обращения: 24.02.2023).
3. Meng K., Sharma A. S., Andonian A., Belinkov Y., Bau D. Mass Editing Memory in a Transformer // arXiv:2210.07229v1 [cs.CL], 13 Oct 2022. URL: <https://arxiv.org/pdf/2210.07229.pdf> (дата обращения: 24.02.2023).
4. Meng K., Bau D., Andonian A., Belinkov Y. Locating and Editing Factual Associations in GPT // arXiv:2202.05262v5 [cs.CL], 13 Jan 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/2202.05262.pdf> (дата обращения: 24.02.2023).
5. Grant N., Metz C. A New Chat Bot Is a "Code Red" for Google's Search Business / The New York Times, 21 December 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nytimes.com/2022/12/21/technology/ai-chatgpt-google-search.html> (дата обращения: 26.02.2023).
6. Stokel-Walker C. ChatGPT listed as author on research papers: many scientists disapprove // Nature. 2023. V. 613. P. 620—621. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00107-z> (дата обращения: 12.03.2023).
7. Официальный сайт проекта ChatGPT. URL: <https://chat.openai.com/auth/login> (дата обращения: 12.03.2023).
8. Официальный сайт OpenAI. Модели. [Электронный ресурс]. URL: <https://platform.openai.com/docs/models> (дата обращения: 12.03.2023).
9. Your 7 Biggest ChatGPT Questions, Answered / Gartner, March 09, 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gartner.com/en/articles/your-7-biggest-chatgpt-questions-answered> (дата обращения: 14.03.2023).
10. Нейросеть ChatGPT написала диплом российскому студенту. Защита прошла суперуспешно / Cnews. Новости. 01.02.2023. [Электронный ресурс]. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2023-02-01_nejroset_chatgpt_napisala_diplom (дата обращения: 12.03.2023).
11. 120+ запросов к нейросети ChatGPT, чтобы ознакомиться с ее возможностями [Электронный режим]. URL: <https://vc.ru/begovatovd/585460-120-zaprosov-k-neyroseti-chatgpt-chtoby-oznakomitsya-s-ee-vozmozhnostyami-i-prosto-veselo-provesti-vremya> (дата обращения: 14.03.2023).
12. Казанцев Т. Chat GPT и Революция Искусственного Интеллекта. — М.: Литрес, 2023. — 140 с.
13. Городничев А. В., Карнаухова А. В., Кривцова О. А. Социально-экономические аспекты внедрения искусственного интеллекта: научное издание / под ред. Агеева А. И. — М.: ООО "Айти Сервис", 2020. — 194 с.
14. Официальный портал "Антиплагиат.ру" [Электронный ресурс]. URL: <https://www.antiplagiat.ru/> (дата обращения: 10.03.2023).
15. Лysачев М. Н., Прохоров А. Н. Искусственный интеллект. Анализ, тренды, мировой опыт / науч. ред. Ларионов Д. А. — Корпоративное издание. — М.: Белгород: КОНСТАНТА-принт, 2023. — 460 с.
16. Щеглов Д. К., Пиликов Н. А., Тимофеев В. И. Концептуальные основы цифровой трансформации организаций оборонно-промышленного комплекса // Автоматизация в промышленности. 2021. № 2. С. 13—23.
17. The Turing test 2.0. / Physics World, May 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://physicsworld.com/a/the-turing-test-2-0/> (дата обращения: 15.03.2023).

THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR CONDUCTING SEARCH-BASED SCIENTIFIC RESEARCH IN THE FIELD OF PRODUCTION ORGANIZATION

^{1,2} D. K. Shcheglov, ^{1,2} A. G. Saybel, ¹ D. A. Fedorov

¹ Joint Stock Company "Northwest Regional Center of the VKO "Almaz—Antey"—Obukhov Plant", St. Petersburg, Russia

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Baltic State Technical University "VOENMECH" D. F. Ustinova", St. Petersburg, Russia

The article is dedicated to presenting the results of testing "conversational" artificial intelligence (AI) systems ChatGPT for conducting scientific research. The peculiarities of formalizing verbal interaction with ChatGPT are examined. The results of the analysis of the possibility of automating research on the trends in the development of theories of project design and industrial production organization are presented. Methodological recommendations for conducting research-using systems of the discussed class are provided.

Keywords: artificial intelligence, large language models, search-based research, ChatGPT, production organization, development forecast.

Bibliography — 17 references.

Received March 22, 2023

УДК 656.7.025

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_20

EDN: HAVEGX

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРОВ В ЛЕСНОМ МАССИВЕ. ЧАСТЬ 2. МОНИТОРИНГ СОВОКУПНОСТИ СЕКТОРОВ ЛЕСНОГО МАССИВА. ЭВРИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ

В. В. Билецкая; А. М. Жеребин, д-р техн. наук; М. И. Топорова; А. И. Широков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Предложен методический подход к формированию рационального типажа парка БЛА, позволяющего решать с приемлемым уровнем эффективности задачу мониторинга заданного множества секторов лесных массивов различного размера.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, БЛА, пожары, мониторинг, оптимальные характеристики, обнаружение, рациональный типаж, приемлемые решения.

Можно показать, что для фиксированного по размеру сектора мониторинга оптимальный облик беспилотного летательного аппарата определяется соотношением

$$a^* = \arg \max_{a \in A} \left[\frac{W_1^1(a, L_x, L_y)}{\Delta t(a) C_1(a, N)} \right], \quad (1)$$

$$\text{при условии: } \begin{cases} C_1 N \leq C_\Sigma \\ L_x, L_y = \text{const} \end{cases},$$

где A — область существования альтернативных вариантов БЛА;

$a = (m_0, V_{кр}, L_{max}, m_{пн}, C_1)$ — вектор характеристик альтернативного БЛА;

m_0 — взлетная масса;

$m_{пн}$ — масса полезной нагрузки;

L_{max} — максимальная дальность полета;

$V_{кр}$ — крейсерская скорость полета;

L_x — длина границы сектора мониторинга;

L_y — ширина границы сектора мониторинга;

W_1^1 — вероятность обнаружения одного пожара одним БЛА;

Δt — длительность одного цикла применения БЛА;

C_1 — серийная стоимость одного БЛА;

C_Σ — бюджетные ограничения.

Решение уравнения (1) позволяет оптимизировать облик БЛА для мониторинга сектора фиксированного (заданного) размера. Методический подход к решению данной задачи описан достаточно детально.

Однако на практике встречается более сложная постановка задачи, когда в зону ответственности "наблюдателя" входит несколько секторов, размеры которых к началу исследований известны. Для решения этой более сложной задачи можно предлагать различные варианты решения, например, использовать для мониторинга всех секторов БЛА с предельно высокими характеристиками. Задача мониторинга будет решена, однако, вероятно, затраты на ее решение будут также достаточно высокими. Можно предположить, что существует совокупность БЛА с рациональными характеристиками, позволяющая решать задачу мониторинга с приемлемым уровнем эффективности. В этом случае критерий (1) не может быть непосредственно использован.

Учитывая, что экстремумы в технических системах в большинстве случаев имеют пологий характер, можем выдвинуть следующую гипотезу: при незначительных отклонениях ЛТХ БЛА от оптимальных, показатели эффективности будут иметь незначительные отклонения, и лицами, экс-

Билецкая Валерия Вадимовна, студентка.

E-mail: biletskayavv@gmail.com

Жеребин Александр Михайлович, профессор.

E-mail: amzherebin@gmail.com

Топорова Мария Илларионовна, старший преподаватель.

E-mail: toporovami@mail.ru

Широков Александр Иванович, старший преподаватель.

E-mail: shiraliiv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2022 г.

© Билецкая В. В., Жеребин А. М., Топорова М. И., Широков А. И., 2023

планирующими эту технику, могут быть признаны допустимыми. Такая достаточно простая гипотеза позволяет разработать методический подход для определения приемлемых решений вместо оптимальных [1—4].

Методический подход к формированию рационального типажа БЛА

Предположим, БЛА закупает эксплуатант, исходя из финансовых средств, выделяемых на мониторинг каждого сектора, с одной стороны, и необходимости иметь парк БЛА, способный покрыть все возможные сектора, с другой, тогда возникает вопрос: возможно ли эффективное решение описанной выше задачи мониторинга малым количеством типов БЛА.

Если в интересах дальнейших рассуждений принять следующие обозначения:

i — индекс (номер) сектора мониторинга, $i \in I$;

I — число секторов мониторинга;

$a = (m_0, V_{кр}, L_{max}, m_{пн}, C_1)$ — вектор характеристик альтернативного БЛА, $a \in A$;

A — область существования альтернативных вариантов БЛА;

m_0 — взлетная масса БЛА;

$V_{кр}$ — крейсерская скорость полета БЛА;

L_{max} — максимальная дальность полета БЛА;

$m_{пн}$ — масса полезной нагрузки БЛА;

C_1 — серийная стоимость одного БЛА;

$l_i = (L_x^i, L_y^i, x_{ц}^i, y_{ц}^i)$ — вектор характеристик i -зоны мониторинга;

$x_{ц}^i$ — координата центра патрулируемого сектора по оси X ;

$y_{ц}^i$ — координата центра патрулируемого сектора по оси Y ;

L_x^i — длина границы сектора;

L_y^i — ширина границы сектора;

C_{Σ_i} — бюджетные ограничения для i -сектора.

Для каждого значения вектора l_i может быть найден оптимальный облик БЛА: $a_i^*(m_0^*, V_{кр}^*, L_{max}^*, m_{пн}^*, C_1^*)$, которому соответствует эффективность $W(a_i^*(...))$. Совокупность оптимальных обликов (оптимальных векторов $a_i^*(...)$)

можно назвать идеальной точкой, которой соответствует совокупность эффективностей $\{W(a_1^*(...)), W(a_2^*(...)), ..., W(a_I^*(...))\}$.

В интересах принятия решения о рациональном облике БЛА на множестве секторов наблюдения, введем понятие относительных потерь эффективности — δ . Тогда, если принять $a_\delta^*(...)$ — решение, относительно облика БЛА, не совпадающее с идеальной точкой, а $W(a_\delta^*(...))$ — эффективность такого БЛА (естественно, эффективность $W(a_\delta^*(...))$ ниже эффективности идеальной точки $W(a_i^*(...))$), то относительные потери эффективности можно записать, как:

$$\frac{W(a_i^*(...)) - W(a_\delta^*(...))}{W(a_i^*(...))} \leq \delta \text{ для } \forall i \in I. \quad (2)$$

Если задаться конкретным значением δ , тогда приемлемым решением a_δ^* будет решение, удовлетворяющее неравенству (2). Очевидно, есть δ_{min} , при котором сохраняется неравенство (2). Если δ_{min} по величине удовлетворяет исследователя, то решение $a_\delta^*(...)$ — существует. Если δ_{min} слишком велико и неприемлемо для исследователя, это означает, что не существует единственного БЛА, эффективно решающего все задачи мониторинга. В этом случае возникает задача рационального типажа и областей рационального применения БЛА, входящих в рациональный типаж.

Из этих рассуждений можно сделать следующий вывод: если при некотором δ область приемлемых решений представляет собой компактное (неразрывное) множество точек $a_\delta^*(...)$ (в частном случае — одна точка) и, если $\delta \leq \delta_{лпп}$ — существует единственный БЛА с приемлемой эффективностью, решающей задачу мониторинга всех секторов. Принято, что $\delta_{лпп}$ — значение потерь эффективности, которое лицо, принимающее решение, (ЛПР), считает приемлемым. В противном случае исследование должно быть продолжено.

Если область приемлемых решений разрывна при $\delta \leq \delta_{лпп}$, то возникает несколько компактных подмножеств и приведенные рассуждения необходимо повторить для каждой области приемлемых решений.

Работоспособность модели. Анализ результатов

В качестве примера приведем результаты расчета "приемлемых" решений для зоны контроля 2000×1000 км. Примем в качестве приемлемых потерь эффективности $\delta_{\text{ЛПР}} = (0,1; 0,05; 0,01)$. Анализ влияния допустимого уровня потерь $\delta_{\text{ЛПР}}$ на рациональный типаж БЛА представляет большой интерес. На рис. 1 показана зависимость критерия эффективности (1) от дальности полета

БЛА, как основной отличительной характеристики альтернативных вариантов, и зависимость области приемлемых решений от допустимого уровня потерь эффективности δ .

Аналогично были проделаны расчеты для различных значений площади патрулируемого сектора. Полученные решения представлены на рис. 2—4, где показаны диапазоны приемлемых решений для секторов мониторинга различных размеров и приемлемого уровня потерь эффективности. Результаты расчетов представлены в таблице.

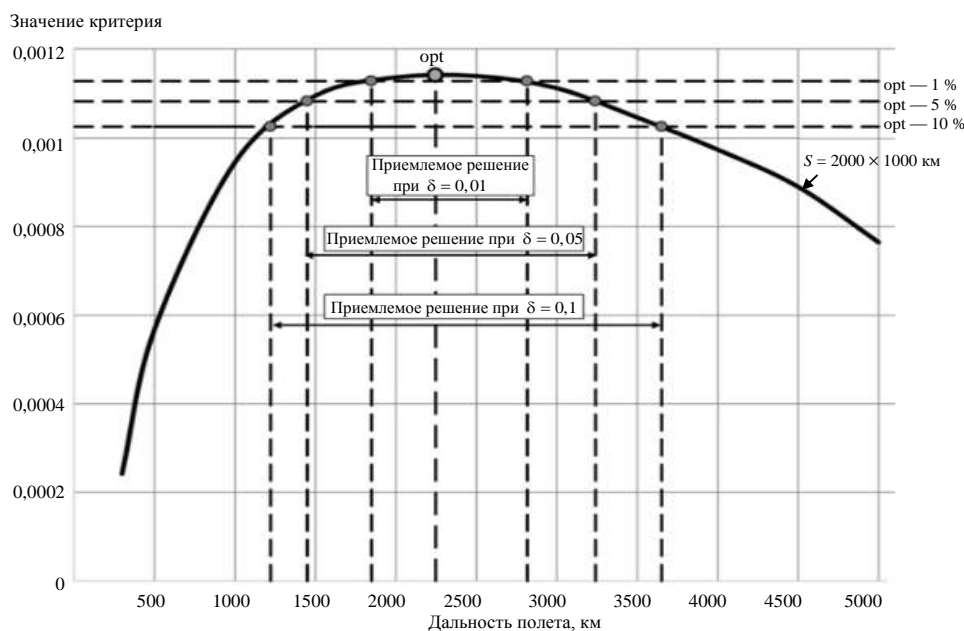


Рис. 1. Приемлемые решения для сектора 2000×1000 км

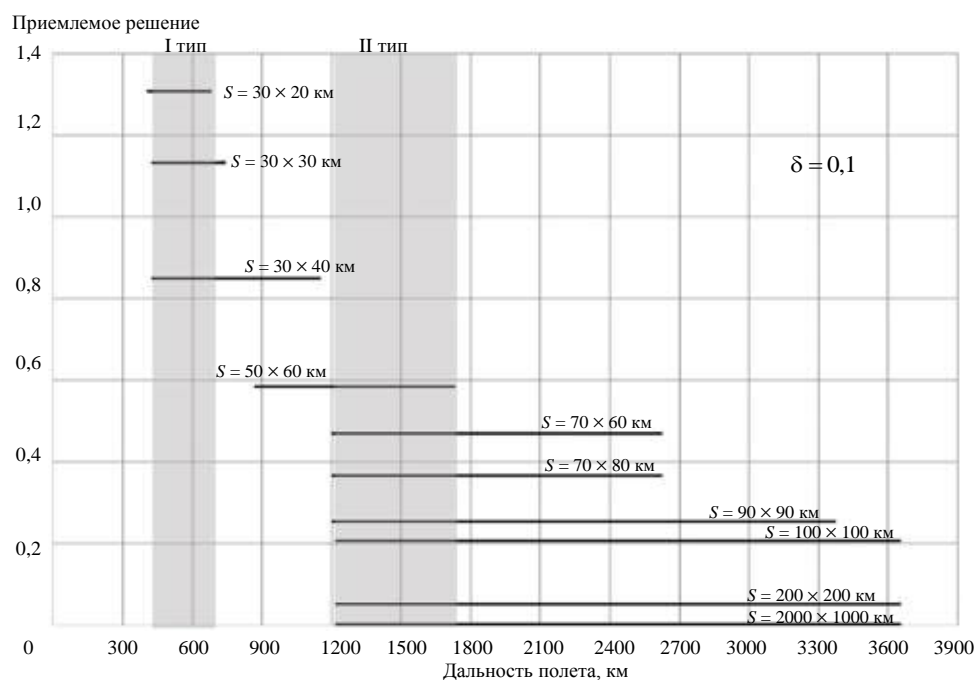


Рис. 2. Приемлемые решения, рациональный типаж БЛА при снижении эффективности на 10 %

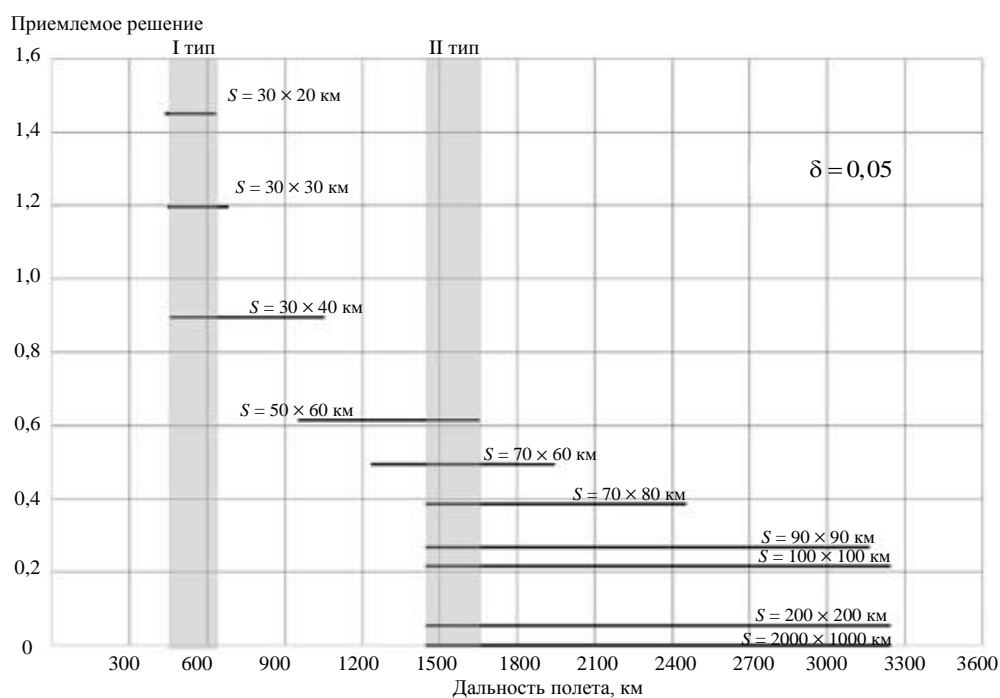


Рис. 3. Приемлемые решения, рациональный типаж БЛА при снижении эффективности на 5 %

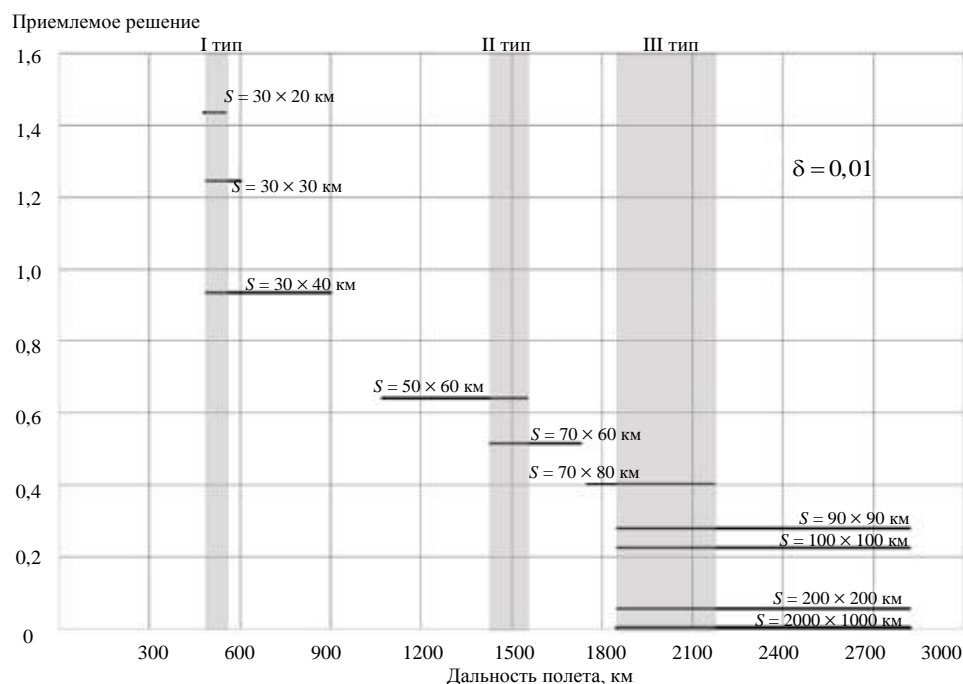


Рис. 4. Приемлемые решения, рациональный типаж БЛА при снижении эффективности на 1 %

Область применения различных типов БЛА при потере эффективности δ

δ	I тип БЛА		II тип БЛА		III тип БЛА	
	Расчетная дальность полета, км	Рациональная область применения (площадь сектора мониторинга), км ²	Расчетная дальность полета, км	Рациональная область применения (площадь сектора мониторинга), км ²	Расчетная дальность полета, км	Рациональная область применения (площадь сектора мониторинга), км ²
0,1 (10 %)	400 ~ 700	≤ 1200	1200 ~ 1800	≥ 1200	—	
0,05 (5 %)	500 ~ 700	≤ 1200	1500 ~ 1700	≥ 1200	—	
0,01 (1 %)	500 ~ 600	≤ 1200	1500 ~ 1600	1200—4200	1900 ~ 2200	≥ 4200

Как видно из рис. 2—4, для секторов наблюдения, размеры которых изменяются от 600 км² до 2000000 км² целесообразно иметь парк, состоящий из II или III типов БЛА. В таблице приведены диапазон дальности полета, которому должен принадлежать тип БЛА, и площадь сектора мониторинга, для которой эффективность мониторинга данным типом БЛА будет не ниже заданного уровня. Увеличение количества типов БЛА в парке приведет к незначительному увеличению эффективности мониторинга, но при этом существенно возрастает стоимость эксплуатации.

Из полученных расчетов можно сделать следующие выводы: при снижении приемлемого уровня потерь $\delta_{\text{ЛПР}}$, рациональное число типов БЛА в общем случае увеличивается, так что, если снижение уровня эффективности недопустимо

($\delta_{\text{ЛПР}} = 0$), рациональное число типов БЛА может быть равно заданному числу вариантов секторов мониторинга (в рамках рассматриваемой выше постановки задачи).

Полученные результаты демонстрируют работоспособность предложенного математико-эвристического аппарата.

Заключение

Представленный в статье методический подход к решению задачи типажа технических средств при решении совокупности задач и предложенная эвристическая процедура решения этих задач показали свою эффективность и, по мнению авторов, могут быть рекомендованы для решения аналогичных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жеребин А. М., Кропова В. В. Приемлемые решения при синтезе сложных технических систем на этапе внешнего проектирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 1. С. 40—43.
2. Жеребин А. М., Кропова В. В. Критериальные аспекты принятия решений в задачах внешнего проектирования, оценки эффективности, оптимизации состава авиационных комплексов: сб. докл. Юбилейной научн.-техн. конф. "Авиационные системы в XXI веке": В 2 т. — М.: ГИЦ РФ ФГУП "ГосНИИАС", 2006. Т. 1. С. 475—490.
3. Треногин В. А. Функциональный анализ. — М.: Наука. 1980. — 496 с.
4. Семенов С. С. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технологического уровня сложных технических систем. — М.: Ленанд, 2016. — 520 с.

SIZING JUSTIFICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLE AIMED TO SOLVE THE PROBLEM OF FOREST FIRE DETECTION. PART 2. FOREST SECTORS TOTALITY MONITORING. HEURISTIC PROCEDURES

V. V. Biletskaya, A. M. Zherebin, M. I. Toporova, A. I. Shirokov
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

A methodical approach of the rational type UAV fleet formation is proposed to solve efficiently the problem of the various sized forest sectors totality monitoring.

Keywords: unmanned aerial vehicle, UAV, fires, monitoring, optimal dimensions, detection, rational type, reasonable solution.

Bibliography — 4 references.

Received January 16, 2023

УДК 623.7, 629.7, 656.7

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_25

EDN: HBUQNA

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ КОМПЛЕКСА СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППИРОВКИ ТРАНСПОРТНОЙ АВИАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ТРАНСПОРТНО-ДЕСАНТНЫХ ЗАДАЧ

Н. Б. Топоров, д-р техн. наук; *В. Л. Мирошкин*, канд. физ.-мат. наук; *Д. С. Вавилов*
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Предложен подход к построению комплекса ситуационного моделирования функционирования группировки транспортной авиации при решении задачи оптимизации количественно-качественного состава самолетного парка группировки по выбранному критерию с учетом принятых ограничений и допущений, как один из вариантов обоснования рационального состава группировки транспортных ВС при решении транспортно-десантных задач.

Ключевые слова: комплекс ситуационного моделирования, моделирование функционирования группировки, группировка транспортной авиации, оптимизация состава группировки, транспортная авиационная группировка, моделирование функционирования транспортной авиации, задача оптимизации, оптимизация состава самолетного парка.

Задача оценки эффективности применения группировки транспортной авиации (ТА) при решении транспортно-десантных задач — одна из наиболее актуальных задач при определении облика перспективной транспортной системы, её отдельных элементов и обличковых характеристик перспективных транспортных авиационных комплексов (АК). Одной из ее подзадач является обоснование рационального состава авиационной группировки транспортных АК. Задача обоснования рационального состава этой авиационной группировки является многокритериальной и трудноформализуемой [1]. Трудность заключается как в сложности формализации понятия "рациональность" состава, так и в том, что для авиационной группировки, как сложной системы, включающей несколько подсистем, тяжело сформировать единую функцию оптимизации, которая бы соответствовала понятию рациональность.

Одним из вариантов обоснования рационального состава группировки ТА является задача оптимизации по выбранному критерию количественно-

венно-качественного состава самолетного парка группировки с учетом принятых ограничений и допущений. В силу большой размерности получаемой оптимизационной задачи, решать эту задачу возможно только с помощью моделирования функционирования группировки ТА [2].

Предложен подход к построению комплекса ситуационного моделирования функционирования авиационной группировки ТА для решения задачи моделирования ее функционирования при решении транспортно-десантных задач.

Техническая постановка задачи

Рациональность состава авиационной группировки ТА оценивается множеством количественных и качественных показателей. Из множества количественных показателей можно выделить две группы — затратные (стоимостные) показатели и показатели результативности (эффект, эффективность в узком смысле) [3].

Оптимизационную задачу по обоснованию рационального состава авиационной группировки ТА на заданный период времени сформулируем следующим образом.

При условии выполнения всего объема поставленных задач за фиксированное время проведения операции требуется определить:

- состав группировки, обеспечивающий решение поставленной задачи в заданных условиях;
- оптимальный маршрут движения каждого воздушного судна (ВС);

Топоров Николай Борисович, доцент.

E-mail: toporovnb@mail.ru

Мирошкин Владимир Львович, доцент.

E-mail: fugu01@mail.ru

Вавилов Денис Сергеевич, старший преподаватель.

E-mail: vav_denis@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2023 г.

© Топоров Н. Б., Мирошкин В. Л., Вавилов Д. С., 2023

- полетное расписание и индивидуальные полетные планы с указанием маршрутов полета по аэродромной сети;
 - планы и схемы загрузки ВС в каждом рейсе с учетом ограничений.
 - оценить его эффективность по выполнению заданного объема задач в расчетном сценарии;
- при заданных:
- множестве типов военно-транспортных самолетов $\{N_i\}$;
 - расчетных сценариев применения ТА в виде определения объектов перевозок и пунктов (набора пунктов) отправки и назначения.

Математическая постановка задачи

Оптимизация по стоимости. Необходимо найти такой вариант группировки ТА $N^* = \{N_i^*\}$, при котором выполняется условие:

$$F(N^*, Q) = \min_{\substack{AK \\ \text{Такт. реш}}} F(N, Q)$$

при ограничениях: $Q(N) = Q_{зд}$;

где $F(N, Q)$ — целевая функция, характеризующая стоимостные затраты на создание и содержание группировки, состоящей из $N = \{N_i\}$ самолетов и обеспечивающей решение поставленной задачи.

$$F(N, Q) = \sum_i (C_{3i} + C_{ЭК_i}) \cdot N_i \quad i = \overline{1, I};$$

- C_{3i} — стоимость серийного ВТС i -го типа;
- $C_{ЭК_i}$ — затраты на эксплуатацию одного ВТС i -го типа.

Выражение для определения $Q(N)$ запишем в виде

$$Q(N) = \sum_i \sum_p G_{ip} \cdot N_{ip}$$

при $i = \overline{1, I}; \quad p = \overline{1, P_i};$

- где $Q_{зд} = G_{ц}^{\Sigma}$ — объем типовой задачи;
- $G_{ц}^{\Sigma}$ — суммарная масса объектов перевозок, заданных в задаче;
- G_{ip} — средняя грузоподъемность i -го самолета в p -м вылете на выполнение задачи;
- N_{ip} — количество самолетов, участвующих в p -м вылете, на выполнение задачи.

Оптимизация по времени. Необходимо найти такой вариант группировки ТА $N^* = \{N_i^*\}$, при котором выполняется условие:

$$T(N^*, Q) = \min_{\substack{AK \\ \text{Такт. реш}}} T(N, Q)$$

при ограничениях: $Q(N) = Q_{зд}$;

где $T(N, Q)$ — целевая функция, характеризующая время выполнения операции, состоящей из $N = \{N_i\}$ самолетов и обеспечивающей решение поставленной задачи.

$$T(N, Q) = \sum_i (T_3 + T_p + T_o + T_b) \cdot N_i; \quad i = \overline{1, I};$$

- T_{3i} — время загрузки ВС i -го типа;
- T_{pi} — время рейса ВС i -го типа;
- T_{oi} — суммарное время, затраченное на обслуживание ВС i -го типа во время рейса (время необходимое на выполнение до-заправки);
- T_{bi} — время выгрузки ВС i -го типа.

Выражение для определения $Q(N)$ записывается в виде:

$$Q(N) = \sum_i \sum_p G_{ip} \cdot N_{ip}, \quad i = \overline{1, I}; \quad p = \overline{1, P_i}$$

- где $Q_{зд} = G_{ц}^{\Sigma}$ — объем типовой задачи;
- $G_{ц}^{\Sigma}$ — суммарная масса объектов перевозок, заданных в задаче;
- G_{ip} — средняя грузоподъемность i -го ВС в p -м вылете на выполнение задачи;
- N_{ip} — количество ВС, участвующих в p -м вылете, на выполнение задачи.

Состав минимальных требований к имитационно-аналитическим моделям оценки эффективности АТ

Решение сформулированной таким образом задачи требует декомпозиции на подзадачи, решение которых обеспечивается основными расчетными блоками (моделями), представляющими описания внешней среды операции и исходных данных, для каждого из которых может быть сформулирован свой дополнительный (локальный) критерий, не противоречащий глобальному.

Принципиальная структурная схема решаемой задачи комплекса приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура комплекса

Приведенная схема отражает структуру комплекса на более высоком уровне. Каждый из расчетных блоков схемы представляет сложно иерархичную систему моделей.

Облик комплекса

Система моделей комплекса ситуационного моделирования функционирования авиационной группировки ТА при решении транспортно-десантных задач предназначена для проведения

оценок эффективности выполнения группировкой АК ТА совокупности целевых задач в операции (конфликте), выработки рекомендаций по рациональному составу группировки АК ТА, получения сравнительных оценок эффективности АК ТА в составе группировки.

Сложность комплексного решения состоит в большой размерности задачи и ее постоянного разбиения на множество подзадач [4]. Это продемонстрировано наглядно на следующей схеме (рис. 2).

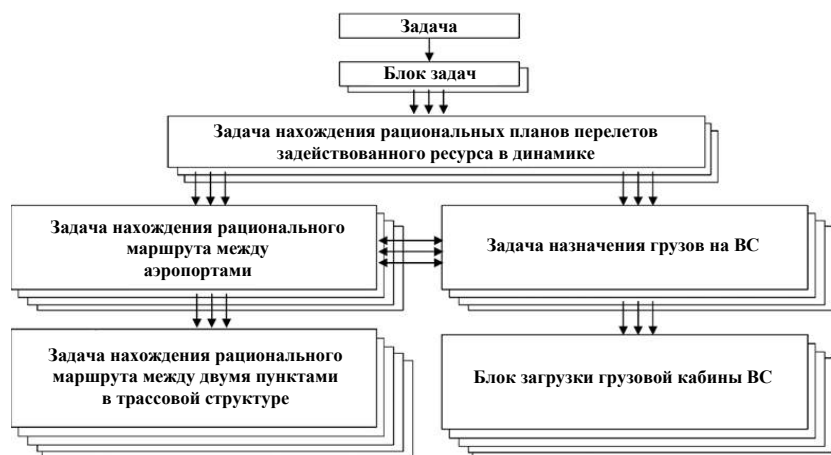


Рис. 2. Схема увязки операции с задачами расчетного блока

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости разбиения расчетных блоков для обеспечения возможности распределения их на множестве вычислительных узлов для обеспечения суммарной скорости работы всего комплекса с последующей увязкой всех используемых расчетных блоков. Для этого и было разработано ядро комплекса, призванное решить такую проблему [5].

Ядро комплекса

Под ядром комплекса ситуационного моделирования подразумевается совокупность программных блоков, реализующих следующие основные функции:

- обеспечение диспетчеризации выполнения моделей (последовательность, удаленность работы, и т. д.);
- обеспечение организации полного цикла работы моделей (подготовка инженерными данными, запуск, передача результатов, и т. д.);
- обеспечение организации централизованного единого информационного пространства;
- обеспечение связанности моделей на уровне данных;
- обеспечение вывода результатов моделирования.

Из перечисленных основных функций ядра были реализованы 3 основных программных блока, обеспечивающие работу полного цикла работы всего комплекса:

- диспетчер вычислительного узла;
- универсальный внутримодельный интерфейс;
- хранилище данных.

Диспетчер вычислительного узла

Диспетчер вычислительного узла (ДВУ) представляет собой систему, содержащую информацию о находящемся в распоряжении текущего узла перечне моделей, и отвечает за запуск, работу и обмен данными между этими моделями.

При запуске вычислительного эксперимента данные, необходимые для его выполнения, в структурированном виде передаются в ДВУ, который располагается на том же вычислительном узле. В свою очередь, ДВУ обрабатывает поступившую информацию и, используя каналы связи с другими ДВУ или центральным управляющим модулем (ЦУМ), определяет те вычислительные узлы, на которых располагаются необходимые для проведения эксперимента модели, и формирует запросы к ДВУ этих узлов.

В результате каждый участвующий в эксперименте территориально-распределенный ДВУ реализует цикл вычислений, используя для этого собственные вычислительные ресурсы. После того

как все запущенные модели отработали, "исполняющий" ДВУ передает результаты их работы "заказывающему" ДВУ, инициирующему эти процессы. Таким образом, результаты работы всех моделей в конечном итоге приходят в главный (в рамках данного эксперимента) ДВУ, который, в свою очередь, транслирует эти результаты в ЦУМ для отображения их исследователю.

В рамках подобной схемы организации вычислительного эксперимента задачи, которые должен решать ДВУ, включают:

- объединение нескольких ДВУ для обеспечения связи в рамках одного эксперимента;
- управление процессами и приложениями, запущенными на пользовательской машине;
- приём и хранение начальных данных, результатов и другой информации, необходимой для проведения расчетов (экспериментов);
- передача исходных данных и/или результатов;
- анализ полученных данных и мониторинг текущих процессов.

Такой подход дает возможность исследователю получать решение без необходимости создания самому модельно-методического аппарата, а также позволяет разработчикам моделей проводить их модификации с последующей передачей специалистам-исследователям.

Рассмотрим более подробно те основные функции, которые реализует диспетчер вычислительного узла.

Функции ДВУ.

Диспетчер вычислительного узла выполняет две основные функции:

- получение и интерпретация команд, поддерживающих реализацию моделирования;
- непосредственное выполнение операций, обеспечивающих управление вычислительным экспериментом.

На ДВУ поступает команда, содержащая всю необходимую информацию. Поступившая команда декомпозируется и распределяется по моделям. В результате автоматически создается набор подкоманд для непосредственного исполнения моделей. После этого ДВУ запрашивает у ЦУМ информацию о вычислительных узлах, на которых располагаются необходимые для проведения эксперимента модели, и их текущем состоянии. Затем ДВУ передает соответствующие команды на исполнение участвующим в реализации вычислительным узлам, используя для этого их ДВУ.

Если какой-либо вычислительный узел, необходимый для проведения эксперимента, "занят" или попросту выключен, то выполнение команды задерживается до тех пор, пока не освободится

требуемый узел. Для каждого вычислительного узла, в случае необходимости, образуется очередь. Когда желаемый вычислительный узел освобождается, в него передается команда, и вычислительная цепочка продолжает выполняться в этом узле.

В подобной системе каждый из вычислительных узлов может функционировать достаточно автономно как отдельная вычислительная машина. И хотя этот принцип одновременного выполнения нескольких программ сам по себе очень прост, его реализация, тем не менее, вызывает определенные трудности.

Организация сетевого взаимодействия между ДВУ

Сетевое взаимодействие между ДВУ на различных вычислительных узлах, а также взаимодействие с ЦУМ, построено по принципу клиент—сервер. При этом каждый ДВУ является как клиентом по отношению к ДВУ более верхнего уровня, так и сервером по отношению к ДВУ более низкого уровня. Такой подход к построению сетевого взаимодействия обеспечивает создание жесткой структуры построения связей и дает представление каждому участвующему ДВУ о его месте в сложно организованной системе. Такое решение организации сетевого взаимодействия можно охарактеризовать как родитель—потомки.

Недостатком этого подхода является необходимость создания внутреннего инструмента, обеспечивающего поиск и связь ДВУ, в результате чего сформированная для одного эксперимента структура будет отличаться от структуры для другого эксперимента.

К преимуществам подобного варианта сетевого взаимодействия ДВУ можно отнести возможность использования комплекса в сложно организованной сетевой структуре, т. е. наличие более одной подсети.

Сетевое взаимодействие отражает вид и характеристики информационного обмена между разными ДВУ.

Информацию можно условно разделить на два типа:

- сервисная;
- вычислительная.

К сервисной информации относится вся необходимая служебная информация для обеспечения функций ДВУ. Команда представляет собой строку, которую ДВУ интерпретирует в действие. Результат этого действия передается в виде строки обратно "заказчику", т. е. узлу, приславшему команду.

К вычислительной информации относится информация, необходимая для обеспечения работы моделей (исходные данные для задействованных

моделей, результаты). Такая информация, как правило, является сложной, не структурированной и может быть представлена различной совокупностью типов данных. Помимо того, эта совокупность данных индивидуальна для каждой модели.

Для обеспечения работы моделей и возможности использования результатов вычисления в других моделях был разработан универсальный внутримодельный интерфейс.

Универсальный внутримодельный интерфейс

Универсальный внутримодельный интерфейс (УВИ) представляет собой библиотеку, в которой содержится набор классов, обеспечивающих работу с данными.

Данные, хранящиеся с использованием УВИ, представляют собой структуру структур, где самой мелкой единицей данных представлена структура объекта. Объекту данных обычно сопоставляется физический объект, который необходимо описать (например, самолет, двигатель, аэродром, ВПП и т. д.). Объект данных может содержать ссылки на другие объекты или на список объектов (например, объект самолет может содержать ссылку на объект-двигатель). Таким образом, существует два основных класса обеспечивающих возможность хранения, передачи, выгрузки и загрузки данных:

- Класс, описывающий объект;
- Класс "контейнер" для хранения объектов.

Класс, описывающий объект, как сказано выше, хранит в себе информацию о физическом объекте и может быть описан любыми типами данных (byte, int, long, double, bool, char, string и т. д.). Помимо этого, класс объекта содержит ряд функций, позволяющих выгружать его данные и данные ссылочных объектов, указанные в нем, загружать данные. Класс "контейнер" — это класс, в котором реализована возможность хранения набора объектов. Благодаря этим двум классам можно описать любую сложную иерархическую структуру данных, выгрузить ее или загрузить извне.

В качестве примера структуры данных для хранения и отображения с использованием универсальных интерфейсов рассмотрим классическую постановку задачи транспортной операции.

Формально задачу можно описать следующим образом:

Требуется перевезти заданный объем грузов из начального аэродрома в конечный за заданное время с использованием заданного парка ВС и аэродромной сети.

Иерархическую структуру объектов, описывающие все необходимые для решения задачи данные можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 3.

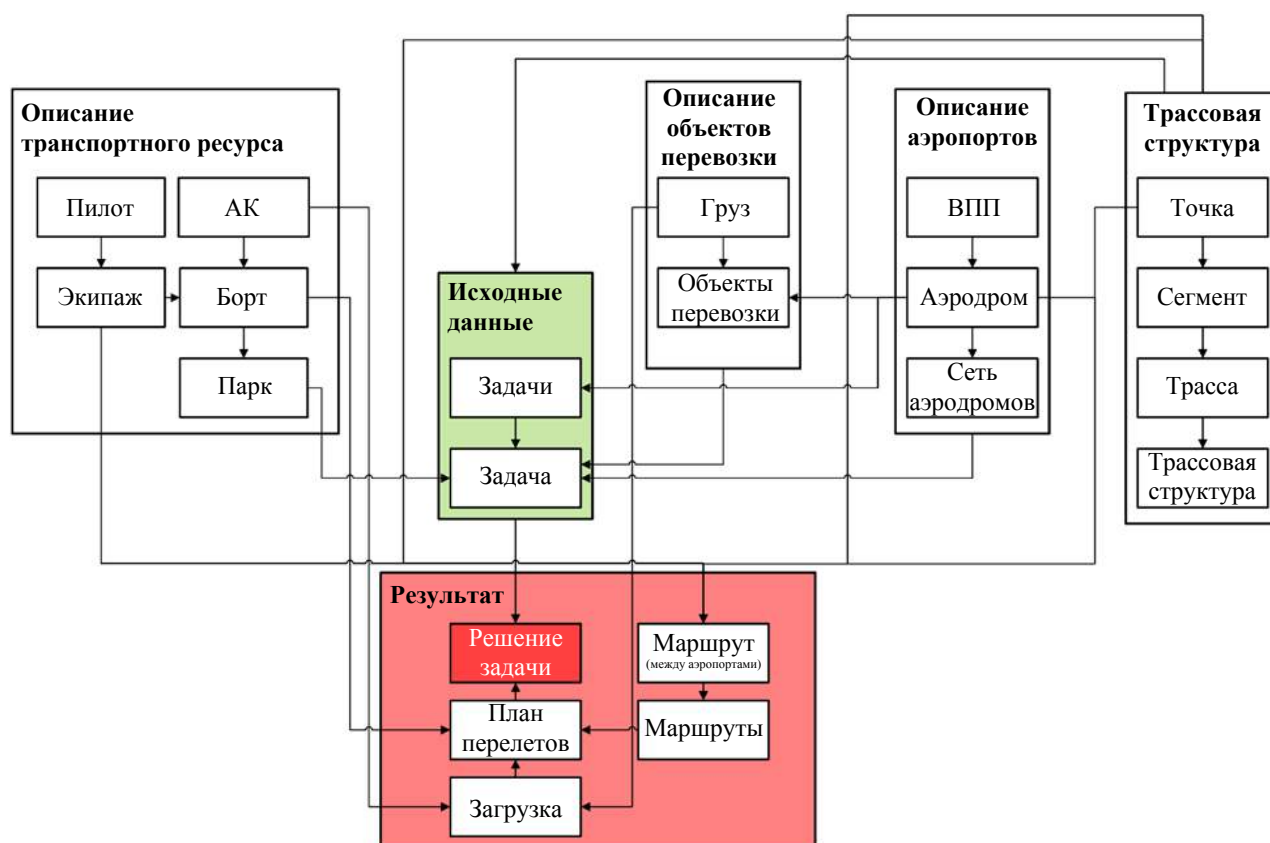


Рис. 3. Структурная схема иерархии объектов

Приведенная схема наглядно демонстрирует, что все объекты, описывающие задачу, тесно связаны друг с другом. Например, объект представляющий борт хранит в себе характеристики воздушного судна с указанием текущего местоположения, аэродрома базирования и др., а также ссылку на объект, в котором представлены технические характеристики самолета, которым является этот борт.

Результатом работы УВИ являются консолидированные данные в виде текста с использованием синтаксиса JSON для дальнейшей его передачи и загрузки в другие модели. Помимо этого, в библиотеке УВИ реализована возможность загрузки этого текста в файл или в разделяемую память.

Хранилище данных

Данный блок предоставляет возможность централизованного хранения всей совокупности информации, используемой комплексом и получаемой в результате его функционирования. Его необходимость обусловлена сложностью организации обмена информацией модельными блоками, работающей на различных уровнях. Помимо этого, единое хранилище позволяет избежать дублирования информации, что может приводить к избыточной работе сети.

С точки зрения программной реализации блок представляет из себя клиент—серверное приложение, где сервер выполняет функцию коммутации клиентов и выполняет их команды по поиску, выбору, изменению или удалению нужной информации, а клиент является частью модельного блока, обеспечивающего работу с информацией. Все хранение информации реализовано на жестком диске в виде кэша, что обеспечивает надежность и отказоустойчивость хранилища.

Работа с данными базируется на тех же принципах, что и работа современных СУБД, но за исключением необходимости создания дополнительных структур, т. е. хранится в том же виде, как и была получена.

Заключение

Таким образом, предложен новый подход к оценке эффективности выполнения целевых задач и формирования рационального состава авиационной группировки транспортной авиации на основе многоуровневой вычислительной системы моделей.

Предложен также принципиально новый подход к построению сложного многоуровневого комплекса, который позволяет организовать вы-

числения распределенно, что, в свою очередь, приводит к уменьшению времени на выработку решения, а также снижает требования к наличию высокопроизводительной техники.

Подход реализует блочный принцип построения комплекса и дает возможность доработки его до уровня комплекса ситуационного моде-

лирования для поддержки как исследователей, так и эксплуатантов, позволяя распределить ответственные модели как как АРМы специалистов, решающих конкретный объем прикладных задач.

Показаны методы и способы реализации этого подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Топоров Б. П., Горлов В. М.** Проблемы формирования рационального облика и типажа сложных технических систем, функционирующих в условиях конфликта и неопределённости: тр. IV Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". — Самара, 2002.
2. **Кропова В. В., Топоров Н. Б.** Интегрированная среда моделирования и оценки эффективности ЛА: сб. трудов юбилейной науч.-техн. конф. "Авиационные системы в XXI веке". Т. 1. — М.: ФГУП ГосНИИАС, 2006. С. 539—547.
3. **Дутов А. В., Сыпало К. И., Топоров Н. Б.** Управление созданием научно-технического задела в авиастроении с использованием ситуационного моделирования // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 11. С. 77—86.
4. **Топоров Н. Б.** Принципы и особенности технологии создания комплексов моделирования и поддержки принятия решений в области совершенствования технического оснащения государственной авиации: сб. трудов юбилейной всеросс. науч.-техн. конф. "Авиационные системы в XXI веке", Москва, 26—27 мая 2016 г. — М.: ФГУП ГосНИИАС, 2017. С. 124—129.
5. **Вавилов Д. С., Топоров Н. Б.** Разработка комплекса средств поддержки выработки замысла и принятия решения для военно-транспортной авиации (ВТА): сб. тезисов докладов "Авиационные системы в XXI веке", Москва, 26—27 мая 2016 г. — М.: ФГУП ГосНИИАС, 2016. С. 13.

AN APPROACH TO GROUPING OF TRANSPORT AVIATION FUNCTIONING SIMULATION COMPLEX DESIGN AND CREATION

N. B. Toporov, V. L. Miroshkin, D. S. Vavilov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

An approach is proposed to the designing a modeling complex for situational simulation of the functioning of a grouping of transport aircraft when solving the task of optimizing the quantitative and qualitative composition of the aviation fleet of the grouping in accordance with the selected criterion and with the adopted restrictions and assumptions. The solution to this task was considered as one of the options for substantiating the rational composition of the grouping of transport aircraft when solving transport and landing tasks.

Keywords: a complex of situational simulation, simulation of the functioning of a grouping, a group of transport aviation, optimization of the composition of a group, a grouping of transport aircraft, modeling of functioning of an aviation, optimization of the composition of an aircraft fleet, an optimization problem.

Bibliography — 5 references.

Received April 14, 2023

УДК 004.056.5:658.512.2.

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_32

EDN: HGORHX

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ НАУКОЁМКОЙ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

Н. Б. Халилюлина

Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
Институт перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА,
Москва, Россия

Рассмотрены технологии, используемые в процессе проектирования и разработки наукоемкой высокотехнологичной продукции (НВП), и программные продукты для автоматизации процессов создания НВП. Проведен анализ документов по стандартизации высокотехнологичных отраслей космической, авиационной, оборонной промышленности, в которых указаны требования по внедрению и развитию цифровых информационных технологий (ЦИТ) на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) продукции. Для эффективного внедрения ЦИТ автор предлагает установить единые требования по их применению в организации-исполнителе по разработке НВП. Автор делает вывод о том, что цифровизация процессов проектирования и разработки наукоемкой высокотехнологичной продукции имеет огромный потенциал для повышения эффективности и качества продукции и является необходимой составляющей в условиях быстроменяющегося рынка и конкуренции.

Ключевые слова: наукоемкая высокотехнологичная продукция, проектирование и разработка, научно-исследовательские работы, опытно-конструкторские работы, цифровые информационные технологии, стандартизация, менеджмент качества.

Программа развития цифровой экономики в Российской Федерации до 2035 г. вместе с другими целями и задачами ставит задачу формирования, и внедрения в различные области научно-производственной деятельности технологий получения, обработки и использования информации в целях оптимизации процессов создания и применения наукоемкой высокотехнологичной продукции (НВП) [1]. Технологии анализа больших объёмов данных, прогнозирования результатов деятельности и оптимизации научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности открывают перспективы выхода на принципиально новый уровень в проектировании и разработке новых перспективных образцов НВП при выполнении научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР).

Эффективность внедрения цифровых информационных технологий (ЦИТ) обеспечивается системным подходом и выполнением следующих условий:

- вовлечение в процессы создания выполнения НИР и ОКР, производства и применения (эксплуа-

ции) НВП всех заинтересованных сторон — организаций её разрабатывающих, выпускающих и применяющих (эксплуатирующих);

- установление единых требований по применению ЦИТ в процессах создания, производства и применения (эксплуатации) НВП;
- применение единых информационных технологий на всех стадиях (этапах) ЖЦ НВП и всеми заинтересованными сторонами, обеспечивающими беспрепятственное получение и использование результатов выполняемых работ.

Рассмотрим влияние применения цифровых информационных технологий в процессах создания НВП рассмотрено в данной работе.

Требования документов по стандартизации по применению информационных технологий в процессах создания НВП

Разработка и внедрение цифровых технологий в процессах создания НВП на различных стадиях (этапах) ЖЦ обусловлена документами по стандартизации (ДС) на системы менеджмента качества таких высокотехнологичных отраслей, как космическая, авиационная, оборонная [2—5].

Требования стандартов по применению ЦИТ на различных стадиях жизненного цикла продукции направлены на повышение результативности и эффективности процессов её создания и приме-

Халилюлина Надежда Борисовна, заведующая сектором системы менеджмента качества, аспирант кафедры электроники.

E-mail: nbh@ipfran.ru

Статья поступила в редакцию 26 мая 2022 г.

© Халилюлина Н. Б., 2023

ния. Так, согласно требованиям "Понимание организации и ее среды" в организации должна быть организована и проводиться на регулярной основе работа по оценке внешних и внутренних факторов, одним из которых является информационное обеспечение организации. К внешним факторам, влияющим на среду организации, относятся сложившиеся условия создания и реализации продукции (работ, услуг) на внутреннем и внешнем рынках, качество поставляемой продукции (выполняемых работ, оказываемых услуг) внешними поставщиками, состояние рынка труда. Одним из наиболее значимых внутренних факторов является автоматизация базовых процессов системы менеджмента качества (СМК) [2].

Результативное функционирование СМК обеспечивается выполнением требований стандартов на СМК, в т. ч. требование "постоянно улучшать процессы и СМК" и внедрять современные методы управления, основанные на автоматизации и информационной поддержке на всех стадиях ЖЦ продукции (выполнении работ, оказании услуг). В составе таких современных процессно-ориентированных методов управления на основе ЦИТ — CALS-технологии в управлении процессом СМК "Управление инфраструктурой", процессом "Управление ресурсами предприятий" — на основе стратегии интеграции производства и управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами (ERP — enterprise resource planning — планирование ресурсов предприятия). Автоматизация бизнес-процессов на новом уровне решается применением программных роботов (RPA — Robotic Process Automation — роботизированная автоматизация бизнес-процессов). Создание виртуальных работников (искусственный интеллект) открывает возможность осуществлять на новом уровне мониторинг процессов и оценку результативности СМК с применением современных технических средств получения и анализа информации [3].

Для выполнения требований стандартов на СМК раздела "Лидерство и приверженность" достижение устойчивого успеха — одна из задач высшего руководства — поддержка улучшения может быть эффективно решена применением ЦИТ в процессах, обеспечивающих функционирование СМК, а также вовлечением всего персонала, участвующего в процессах ЖЦ продукции.

Согласно требованиям раздела "Планирование изменений" стандартов на СМК-программа (план) изменений должна предусматривать меры по внедрению информационных технологий в СМК, а руководителю организации вменяется в обязанность определить необходимость и порядок внедрения изменений, а также развивать ЦИТ и прово-

дить соответствующие мероприятия по их внедрению [2, 3].

Для обеспечения создания продукции также должны быть выполнены требования раздела "Инфраструктура" по содержанию и поддержанию в рабочем состоянии автоматизированного рабочего места (АРМ), проведены верификация и валидации ЦИТ, применяемые при создании НВП. Цель верификации и валидации — установить соответствие требованиям деятельности по исключению сбоев в работе, которые могут повлиять на качество продукции.

Внешние и внутренние коммуникации в области качества — обмен информацией, включающей взаимодействие как внутренних, так и внешних информационных связей, касающихся вопросов СМК, ее процессов, нормативных правовых актов, ТЗ и выполнения требований заказчика в рамках договора (контракта) при выполнении НИР и ОКР при создании НВП. Процесс обмена информацией должен быть задокументирован и реализован посредством ЦИТ, которая позволит выполнить устоявшиеся и введенные вновь функции по выполнению требований ДС, но уже новыми, более эффективными методами и средствами.

Проектирование и разработка (НИР и ОКР), производство НВП — это всегда сложные, многокомпонентные процессы, которые требуют активного участия всех заинтересованных сторон организаций, разрабатывающих, выпускающих и применяющих (эксплуатирующих) её. Чтобы достичь успеха в этом направлении, необходимо обеспечить вовлечение всех заинтересованных сторон в процессы разработки, производства и применения НИР и ОКР. А для обмена информацией с помощью ЦИТ система должна обладать следующими основными свойствами и возможностями:

- обеспечивать получение, распространение и защиту информации;
- осуществлять идентификацию, прослеживаемость, хранение, изъятие информации;
- обладать способностью в реальном времени получать, анализировать, обрабатывать информацию о требованиях заказчика, потребителей и других заинтересованных лиц;
- прогнозировать результаты выполнения работ;
- вырабатывать оптимальные варианты возможных решений с учетом рисков и возможностей, планировать их выполнение;
- определять и оптимизировать требования к ресурсному обеспечению процессов выполнения работ;
- формировать функциональную структуру взаимодействия процессов, состав и функции исполнителей;

- вырабатывать методы и средства реагирования на изменяющиеся требования и условия выполнения работ;
- вносить изменения в процессы, оптимизировать их по различным критериям;
- вырабатывать варианты управленческих решений;
- обеспечивать прослеживаемость результатов процессов и создаваемой продукции;
- осуществлять деятельность по управлению несоответствиями и изменениями;
- соответствовать условиям для результативного и эффективного взаимодействия в формате цифровой экономики с организациями-исполнителями и заказчиками в процессе создания и приемки конечной продукции — с потребителями, поставщиками, аутсорсинговыми организациями, другими участниками создания и применения продукции [6].

Порядок обмена информацией с помощью ЦИТ в рамках разработки НВП должен предусматривать:

- выполнение требований к режиму секретности и обеспечению защиты государственной тайны;
 - различные способы и виды обмена информацией;
 - постоянное взаимодействие между источником и потребителем информации с помощью ЦИТ.
- Один из примеров — это автоматизация процесса управления персоналом;
- создание баз данных (БД) нормативной, справочной и технической документации в организации;
 - выполнение задач по обеспечению получения, распространения и защиты информации, например: внедрение мероприятий по информационной безопасности (ИБ);
 - деятельность по управлению несоответствиями и изменениями;
 - по обеспечению требований защиты информационной безопасности (ИБ) в организации, хранения и внесения изменений;
 - программного обеспечения, в котором носители первичной информации должны максимально соответствовать требованиям автоматизированной обработки [6].

Примером может служить внедрение автоматизированной информационной-аналитической системы в области управления качеством, которая будет предназначена для всестороннего решения задач по системе качества в процессе разработки и производства продукции, а методологической основой решения поставленных задач будет служить выполнение требования к системам качества, которые определены не только в ISO 9000, но и

в отраслевых стандартах (СРПП ВТ, КСКК и т. п.).

Применение цифровых информационных технологий на стадиях ЖЦ наукоемкой высокотехнологичной продукции

Для применения ЦИТ на всех этапах жизненного цикла НВП, необходимо определить какими критериями и особенностями наукоемкой продукции, она обладает — инновационность и (или) высокая технологичность, которая оценивается по степени научно-технической новизны, экономическому эффекту (по сравнению с существующими аналогами) на стадиях ЖЦ продукции, результатам интеллектуальной деятельности, подлежащим правовой охране и (или) новых научно-технических, конструктивных или (и) технологических решений [7].

Цифровые технологии, их функции и области их возможного применения на стадиях ЖЦ НВП представлены в таблице.

Документы по стандартизации СМК таких высокотехнологичных отраслей, как космическая, авиационная, оборонная, указывают на обязательное применение ЦИТ на стадиях ЖЦ НВП: внедрение технических и программных средств в процессы для выполнения задач проектирования, изготовления и испытания изделий [2]; значительно повышающим эффективность работы, ускорение процессов и улучшение качества продукции.

При анализе ДС и ЦИТ, применяемых на стадиях ЖЦ НВП, были выявлены причины, препятствующие эффективному внедрению в организациях при разработке и производстве НВП ЦИТ:

1. Процессы взаимодействия с поставщиками, потребителями, аутсорсинговыми организациями и другими участниками по управлению качеством в цепи поставок — не реализованы с помощью ЦИТ, а их способ реализации необходимо описать в ДС, что позволит организовать более эффективное взаимодействие со всеми участниками цепи поставок.

2. Отсутствует единый формат и технологии обмена данными, что является одной из основных проблем развития и применения современных информационных технологий и может привести к трудностям:

- в обмене данными между различными программами и системами, что затрудняет автоматизацию бизнес-процессов и снижает эффективность работы. В связи с этим необходимо создать единый формат и технологии обмена данными, чтобы различные системы могли без проблем обмениваться информацией, — это позволит упростить автоматизацию бизнес-процессов, снизит количество ошибок и повысит производительность труда;

Применение цифровых информационных технологий на стадиях жизненного цикла НВП

Стадия жизненного цикла	Задачи, решаемые с помощью ЦИТ	Цифровые информационные технологии
Исследование рынка, маркетинговые исследования — анализ состояния и тенденции развития рынка по созданию НВП в целях его внедрения.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Анализ рынка (сбор информации о потребителях и конкурентах, о тенденциях в разработке НВП, статистическая обработка данных). 2. Определение потребности целевой аудитории и анализ конкурентов. 3. Анализ эффективности маркетинга: анализ результатов маркетинговых компаний цифровыми инструментами, определение эффективности рекламы, конверсионных процессов, достижения целей и других метрик. Это позволяет оптимизировать маркетинговые усилия и повысить эффективность продукта на рынке. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Программное обеспечение для статистической обработки данных и анализа результатов исследований: SPSS (StatisticalPackagefortheSocialSciences). 2. Онлайн-платформы для проведения маркетинговых исследований — Qualtrics, SurveyMonkey. 4. Программное обеспечение для работы с таблицами и анализа данных — MicrosoftExcel. 5. Программное обеспечение для визуализации данных — Tableau.
Исследования, разработка технического предложения — комплекс научных исследований, моделирование и прогнозирование результатов, позволяющих проработать концепцию продукта и его потенциальные возможности, определить очередность их реализации, а также установить технические требования в целях изыскания принципов и путей создания новых и совершенствования существующих образцов НВП.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Создание прототипа инновационной продукции практически без затрат на экспериментальное обоснование технического решения. 2. Разработка конструкторской и технологической документации. 3. Изготовление, проведение предварительных и приемочных испытаний образцов НВП. 4. Работа по доработке конструкторской документации на опытные образцы разрабатываемой НВП. 5. Изготовление макета с возможностью оценки правильности принятых технических и конструктивных решений. 6. Разработка моделей (математических, физических, информационных и др.), воспроизводящая или имитирующая заданные конкретные свойства разрабатываемого образца НВП или его составной части для проверки принципа действия образца НВП и определения его отдельных характеристик. 7. Изготовление экспериментального образца НВП для проверки и подтверждения обоснованности предложенных технических решений, параметров и характеристик НВП (в том числе в реальных условиях эксплуатации), подлежащих включению в ТТЗ на выполнение ОКР 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Программное обеспечение для механического проектирования, инженерных расчетов, 3D-моделирования, анализа перемещения и стимуляции (Autodesk Fusion 360, Blender). 2. Математические пакеты для анализа и обработки данных, численного моделирования и оптимизации (MATLAB, Scilab, Mathematica). 3. Средства программирования для создания собственных алгоритмов и программирования управления экспериментом, например, Python, C++, Java. 4. Системы автоматического управления и мониторинга для создания и отладки различных стендов и тестовых систем, например, LabVIEW, DASYLab, NI VeriStand. 5. Специализированные программы для автоматизированного проектирования, моделирования и анализа различных физических процессов и явлений решения определенных задач, например, ANSYS, SolidWorks, Altium Designer.
Опытно-конструкторские работы, опытно-технологические работы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разработка конструкторской и технологической документации на опытный образец. 2. Изготовление и испытания опытного образца (опытной партии) НВП. 3. Создание трехмерных модели детали и конструкций. 4. Выполнение инженерных расчетов и оптимизация параметров. 5. Планирование работ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Инструменты и программы для 2D- и 3D-моделирования, используемый для создания 3D-моделей, например, AutoCAD, CATIA. 2. Программа для механического проектирования, позволяющая создавать детали и сборки в 3D, например, SolidWork, для крупных конструкций — Autodesk Inventor, для сложных систем и механизмов — Siemens NX. 3. Программа для автоматизированного проектирования (САПР), в которую входят возможности:

Стадия жизненного цикла	Задачи, решаемые с помощью ЦИТ	Цифровые информационные технологии
Опытно-конструкторские работы, опытно-технологические работы		<p>EDA (Electronic Design Automation — Автоматизация проектирования электроники) — комплекс программных средств и библиотек стандартных элементов, обеспечивающий автоматизацию разработки электронных устройств, в первую очередь, создания микросхем и печатных плат.</p> <p>а) получение, учет, хранение, обработка, анализ и использование информации с помощью системы электронного архива, средства инженерного анализа (CAE) и системы анализа данных;</p> <p>б) изготовление опытных образцов с помощью цифровых средств планирования технологических процессов CAPP, собственно проектирования CAD; подготовки автоматизированного производства CAM;</p> <p>– проведение надежной оценки проектных решений РЭА и ЭРИ также широко используют автоматизированную справочно-информационную систему (АСРН)</p>
Производство (единичных изделий, повторяющихся, серийных, массовых)	<p>1. Единичные изделия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – создание 3D-модели детали для визуализации ее в реальном времени; – расчет расхода материалов, определения технологии обработки и программирования станков; – оптимизация процесса производства и прогнозирования возможных проблем. <p>2. Повторяющиеся изделия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – контроль качества продукции; – отбор и классификация комплектующих с возможностью дальнейшей обработки. <p>3. Серийные изделия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – управление производством; – автоматизация процесса планирования и управления производственными ресурсами; – оптимизация технологических процессов, в т. ч. получение информации о работающем или отказавшем (вышедшем из строя) оборудовании. <p>4. Массовые изделия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – минимизирование времени и ошибок в процессе сборки; – применение систем мониторинга и контроля качества 	<p>1. Программа по 3D-печати — позволяющая создавать прототипы, быстро изготавливать запчасти, производить узлы и детали.</p> <p>2. Программа по использованию бесконтактных методов, таких как сканирование и оптическая съемка, что позволяет обеспечить высокую точность и скорость измерений.</p> <p>3. Машинное обучение.</p> <p>4. CAD/CAM/CAE-системы (компьютерное проектирование, моделирование и анализ) позволяют создавать трехмерные модели, проводить анализ, включая конечно-элементный анализ, сохранять конструкции в формате САПР и передавать их на производство.</p> <p>5. Системы управления жизненным циклом продукта (PLM) позволяют управлять производственным процессом на всех этапах — проектирования, производства, сборки, тестирования, эксплуатации, ремонта и утилизации продукта.</p> <p>6. PLC — это электронная система для цифровых вычислительных операций, которая выполняет функцию управления промышленным оборудованием.</p> <p>7. Интернет вещей (IoT) — сенсоры и устройства IoT позволяют следить за производственными машинами и оборудованием, накапливать данные и проводить анализ для повышения эффективности производства.</p> <p>8. Автоматизация производства — автоматические системы для сборки, проверки и упаковки продукции позволяющие сократить затраты на трудовые ресурсы и повысить эффективность.</p>

Окончание табл.

Стадия жизненного цикла	Задачи, решаемые с помощью ЦИТ	Цифровые информационные технологии
Производство (единичных изделий, повторяющихся, серийных, массовых)		<p>9. Системы управления производством (MES) — управление и мониторинг производственных операций и процессов.</p> <p>10. Большие данные (Big Data) — управление и анализ больших объемов информации в производственных процессах для повышения их эффективности и качества</p>
Эксплуатация (применение, хранение)	Анализ положительного эффекта от использования НВП	<p>1. Интернет вещей (IoT) позволяет создать сеть подключенных к Интернету устройств в целях наблюдать за состоянием и работой оборудования.</p> <p>2. Интеллектуальный анализ данных (AI): обработка больших объемов данных и поиск скрытых связей, которые могут указывать на возможные причины выхода из строя.</p> <p>3. Аналитика предметной области (BDA): анализ данных, полученных из различных источников в целях выявления корреляции, аномалий и других факторов, которые могут влиять на работу продукции.</p> <p>4. 3D-моделирование: использование 3D-моделей для создания виртуального прототипа и анализа его работы, что позволяет быстро выявлять и исправлять недостатки в конструкции.</p> <p>5. Системы мониторинга и диагностики: мониторинг работы оборудования и выявление возможных проблем в реальном времени.</p> <p>6. Анализ изображений: использование компьютерного зрения для анализа изображений, полученных с различных камер и датчиков, что позволяет выявлять любые аномальные события</p>
Ремонт	Анализ выхода из строя НВП. Разработка ремонтной документации. Работы по восстановлению НВП	
Утилизация	<p>Повышение эффективности утилизации и сокращение негативного воздействия на окружающую среду.</p> <p>Идентификация и классификация отходов.</p> <p>Разработка и/или выбор способов утилизации НВП.</p> <p>Мониторинг утилизации</p>	<p>1. Программы автоматизации, идентификации и классификации отходов, позволяющие сократить время на данный процесс и позволяющие определять способ утилизации.</p> <p>2. Сенсорные технологии для мониторинга параметров утилизации в режиме реального времени и реагирования на возможные выбросы и проблемы.</p> <p>3. Программы разработки эффективных методов извлечения компонентов, таких, как цветные металлы и компоненты для повторного использования их в других продуктах</p>

• в области безопасности данных, в связи с тем, что различные системы могут иметь разные уровни защиты информации и способы ее передачи. В результате, данные могут оказаться уязвимыми к несанкционированному распространению. Для решения данной проблемы необходимо разработать стандарты и протоколы обмена данными, которые будут подходить для различных типов систем и приложений. Также важно обеспечить доступность стандартов для

всех заинтересованных сторон и их безопасность.

3. В организациях ЦИТ применяются фрагментарно, на отдельных этапах жизненного цикла, а не на всех этапах, это связано с:

• общим характером требований ДС по применению ЦИТ, выполняя которые каждая из организаций их реализует, руководствуясь собственными потребностями и возможностями, применяя известные программные продукты или разрабатывая их самостоятельно;

- высокой стоимостью внедрения цифровых технологий на всех этапах ЖЦ изделия — внедрение цифровых технологий может требовать значительных финансовых инвестиций, поэтому необходимо убедиться в целесообразности этих затрат и выработать стратегию выделения средств на этот процесс;

- наличием квалифицированных специалистов — для внедрения ЦИТ необходимы специалисты, которые знают, как использовать эти технологии и как оптимизировать производственные процессы;

- несовместимостью существующих систем с новыми технологиями — необходимо решить проблему совместимости или провести замену устаревших систем;

- техническими проблемами при внедрении новых технологий — сложность интеграции систем или настройки технологий;

- различиями в ЦИТ, применяемых на разных этапах ЖЦ изделия. Например, на этапе исследований может потребоваться аналитика данных, а на этапе производства — автоматизация производства;

- поддержкой руководства — руководство организации должно убедиться в необходимости внедрения цифровых технологий и предоставить необходимые ресурсы и поддержку этому процессу.

4. НВП в различных отраслях может иметь разные требования к цифровым технологиям и программным продуктам. Например, в производстве радиоэлектронных изделий используются специализированные программы разработки, проектирования, моделирования, тестирования и управления производственными процессами, которые помогают организациям-изготовителям повысить эффективность производства, сократить время и затраты на разработку и тестирование изделий, а также улучшить качество и надежность производимой продукции. В автомобильной промышленности используют специализированные программы для дизайна и моделирования, которые позволяют оптимизировать процесс создания продукции. Поэтому адаптация цифровых технологий и программных продуктов является важным этапом внедрения инновационных решений в производственные процессы и может привести к увеличению эффективности и экономичности производства.

5. Отсутствуют общие требования ДС по применению ЦИТ. Каждая из организаций их использует, руководствуясь собственными потребностями и возможностями, применяя известные программные продукты или разрабатывает их самостоятельно.

Для эффективного внедрения ЦИТ в организациях, выполняющих НИР и ОКР необходимо:

- провести работу по исключению перечисленных причин, препятствующих эффективному внедрению ЦИТ в организациях по разработке и производству НВП;

- адаптировать существующее программное обеспечение или разработать программное обеспечение силами сотрудников организации-исполнителя НИР и ОКР, которое будет учитывать специфику организации в разработке и производстве НВП, руководствуясь своими уникальными целями и задачами.

Требования к цифровизации процессов проектирования и разработки НВП в организации-исполнителе НИР и ОКР

Цифровизация процессов проектирования и разработки НВП в организации-исполнителе НИР и ОКР является важным условием для улучшения качества продукции и повышения эффективности процессов ее создания. Однако, чтобы использование этих технологий было эффективным, необходимо установить единые требования по их применению в организации исполнителе НИР и ОКР, которые должны включать в себя:

1. Стандартизацию цифровых технологий в различных процессах ЖЦ НВП. Это поможет унифицировать и облегчить работу в различных отраслях создания инновационной продукции и облегчит взаимодействие между заказчиком и исполнителем НИР и ОКР.

2. Внедрение интегрированной системы управления проектами. Это позволит объединить все процессы проектирования и разработки в единый цифровой интерфейс, тем самым повысить эффективность управления проектами — контролировать сроки и бюджет, управлять рисками на всех этапах ЖЦ.

3. Применение современных программных инструментов и технологий в процессах НИР и ОКР, которые позволят обеспечить моделирование, анализ и тестирование создаваемого изделия.

4. Обучение и повышение квалификации сотрудников — обучение на постоянной основе и повышение квалификации персонала в области цифровизации процессов проектирования и разработки, актуализация информации о программном обеспечении и технологиях.

5. Обеспечение безопасности процессов НИР, ОКР, изготовления и эксплуатации инновационной продукции, включая обеспечение конфиденциальности и защиты информации, составляющую коммерческую, служебную или иную тайну, пер-

сональные данные, а также мероприятия по информационной безопасности.

6. Координацию и управление действиями участников процесса — разработка норм и правила поведения участников процесса НИР и ОКР.

7. Обеспечение доступности информации с помощью создания единой системы хранения и обмена информацией — создание базы данных, содержащих информацию о процессах ЖЦ продукции.

8. Разработку системы контроля качества — организация-исполнитель должна разработать систему контроля качества для цифровизации процессов проектирования и разработки. Это позволит подтвердить соответствие проектных решений, заданных в техническом задании и про-

верить выполнение требований стандартов исполнителем.

9. Разработку стратегического плана по цифровизации процессов проектирования и разработки продукции, который должен быть связан с миссией организации и учитывать ее специфику, структуру и процессы.

Выводы

Выполнение указанных требований позволит повысить качество продукции и эффективность процессов ЖЦ НВП, что является ключевым фактором конкурентоспособности организаций, выполняющих работы по созданию НВП на рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие цифровой экономики в России. Программа до 2035 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>.
2. ГОСТ РВ 0020-57.412-2020 Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Требования к системе менеджмента качества.
3. ГОСТ РВ 0015-002-2020 Система разработки и постановки на производство военной техники Система менеджмента качества. Требования.
4. ГОСТ Р 58876-2020 Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Требования.
5. ОСТ 134-1028-2012 Ракетно-космическая техника. Требования к системам менеджмента качества предприятий, участвующих в создании, производстве и эксплуатации изделий.
6. Сидорин В. В., Халилюлина Н. Б. Система управления проектированием и разработкой наукоемкой высокотехнологичной продукции на основе цифровых информационных технологий // Автоматизация в промышленности. 2023. № 3. DOI: 10.25728/avtprom.2023.03.10.
7. Приказ Минкомсвязи России от 10 октября 2013 г. № 286 "Об утверждении критериев отнесения товаров, работ, услуг к инновационной продукции и (или) высокотехнологичной продукции для целей формирования плана закупки такой продукции".

STATE AND PROSPECTS OF DIGITALIZATION OF DESIGN AND DEVELOPMENT PROCESSES OF SCIENCE-INTENSIVE HIGH-TECH PRODUCTS

N. B. Khalilyulina

Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhniy Novgorod, Russia
Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of the RTU MIREA, Moscow, Russia

The article deals with modern technologies used in the design and development of high-tech products (HPC), and software products for the automation of HPC creation processes. An analysis of documents on the standardization of high-tech industries in the space, aviation, defense industry, which specify the requirements for the introduction and development of digital information technology (DIT) at all stages of the life cycle (LCC) of products. For effective implementation of DIT the author proposes to establish unified requirements for their use in the organization-executor on the development of NVP. In conclusion the author concludes that digitalization of design and development of knowledge-intensive high-tech products has enormous potential to improve the efficiency and quality of products and is an essential component in a rapidly changing market and competition.

Keywords: high-tech products, design and development, research and development, development work, digital information technology, standardization, quality management.

Bibliography — 7 references.

Received May 26, 2023

УДК 621.37

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_40

EDN: HJOKVZ

УДАЛЕННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПИТАТЕЛЬНОЙ СМЕСИ ДЛЯ ГИДРОПОННЫХ УСТАНОВОК

Д. Б. Петленко, канд. техн. наук

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

Рассмотрен вариант удаленного контроля питательной смеси для гидропонных установок на основе Ардуино. С учетом анализа возможностей Ардуино, решаемой задачи и материальных затрат произведен выбор компонентов. Для такого класса установок предложен эффективный и экономичный способ увеличения времени работы без дополнительных калибровок.

Ключевые слова: контроль питательной смеси для гидропонных установок, датчик проводимости tds, калибровка датчика tds, датчик pH.

Гидропоника — метод выращивания растений без почвы, при котором корневая система растения непосредственно подвергается воздействию богатых питательными веществами растворов. Поскольку рост и развитие растений зависят исключительно от питательного раствора, очень важно контролировать качество гидропонной смеси, чтобы обеспечить питание растений и культур.

Причины, по которым важно контролировать качество гидропонной смеси:

1. *Оптимальный рост растений.* Качество гидропонной смеси влияет на доступность питательных веществ для растений. Если в смеси не хватает необходимых составляющих, рост растений будет более медленным, а урожайность — низкой. Поэтому для обеспечения оптимального роста растений необходима сбалансированная гидропонная смесь.

2. *Профилактика болезней,* связанных с неправильно подобранной маской профиля питательных веществ. Неправильно подобранные гидропонные смеси могут привести к дефициту разных питательных веществ. Например, недостаток кальция часто приводит к загибанию листьев в виде когтя. Недостаток калия — к светлой каемке по краю листа для ряда культур.

Предотвращение дефицита питательных веществ в динамике. Со временем питательный раствор может изменить свои свойства. Причин может быть много — и температура окружающей

среды, питательной смеси и освещенность и фаза развития той или иной культуры и т. д. В зависимости от этих внешних факторов будет изменяться и потребление питательной смеси и ее компонентов. Регулярно контролируя и регулируя состав гидропонной смеси, можно предотвратить дефицит питательных веществ и обеспечить растения всеми необходимыми микроэлементами.

3. *Экономическая эффективность.* Есть регионы, где выращивать различные сельхозкультуры в почве невозможно (районы вечной мерзлоты). Стоимость сельскохозяйственной продукции в таких районах во много раз превышает стоимость аналогичной продукции в центральной части России. В зоне рискованного земледелия урожайность также может быть не предсказуемой. Существенная статья расходов в гидропонном хозяйстве — электроэнергия. Но в некоторых регионах необходимо выбирать: или доставка и хранение продуктов или выращивание на месте с затратами на освещение и обогрев. Поэтому развитие гидропонных методов выращивания — необходимость и контроль качества гидропонной смеси обязателен для снижения общих эксплуатационных расходов.

Для правильно сбалансированного по составу минеральных солей раствора контролируется кислотно-щелочной баланс и концентрация солей в растворе. Кислотно-щелочной баланс (pH) должен находиться в узком коридоре. Выход за пределы этого коридора, приведет к тому, что некоторые вещества будут плохо усваиваться (см. рис. 1).

На рис. 1 по горизонтали pH. Наглядно видно, что нет такой вертикальной линии, которая бы соответствовала идеальному поглощению всех элементов. Общепринятым интервалом pH в литературе принято считать от 5,5 до 6,5 [1, 2].

Петленко Дмитрий Борисович, доцент кафедры "Радиоволновые процессы и технологии".

E-mail: petlenko@mirea.ru

Статья поступила в редакцию 17 мая 2023 г.

© Петленко Д. Б., 2023

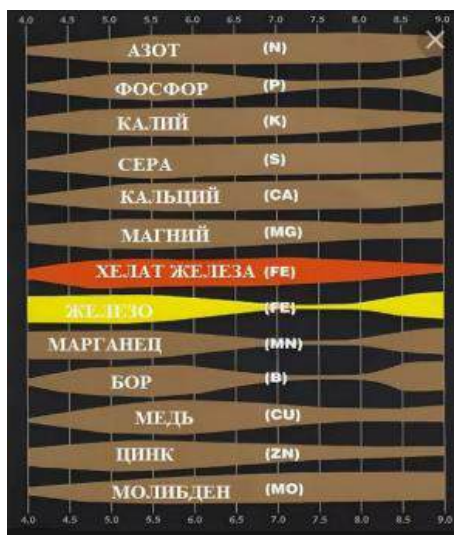


Рис. 1. Диаграмма зависимости поглощения элементов растениями от pH питательной смеси

Не менее важно и значение электропроводности раствора, которое показывает количественное содержание солей в питательной смеси. Содержание солей серьезно влияет на развитие растений и, соответственно, на качество и количество урожая. В зависимости от разновидности выращиваемых растений этот параметр меняется. Также на него влияет еще много факторов — температура, освещенность, влажность, фаза произрастания.

Поэтому контроль за этими параметрами, в том числе и удаленный, — важный элемент работы в гидропонном хозяйстве. Во многих других отраслях (качество воды в бассейнах, очистка сточных вод, промышленности и мониторинге состояния окружающей среды), где требуется водоподготовка, также необходимо контролировать эти параметры [3].

В рамках исследования предлагается вариант удаленного контроля pH и электропроводности (ЕС) раствора на основе аппаратно-программной платформы Ардуино (Arduino). В герметичной пластиковой коробке компактно размещены модуль Ардуино Уно, датчик pH, датчик проводимости воды TDS (англ. Total Dissolved Solids — общее количество растворенных твердых веществ, общая минерализация), и модуль GSM (рис. 2).

Передача информации с платы Ардуино возможна несколькими способами, включая GSM, Wi-Fi и последовательный интерфейс (Rx, Tx).

Первый вариант использует модуль GSM для передачи данных по сотовой сети. Он подходит для приложений, требующих удаленной связи, или для ситуаций, когда беспроводная сеть недоступна. На практике этот вариант может оказаться дорогим, так как потребуются активное использование сотовой сети для передачи пакетов со служебной информацией.



Рис. 2. Компоненты модели в сборе

Второй вариант использует модуль Wi-Fi для передачи данных по беспроводной сети. Он идеально подходит для приложений, требующих высокоскоростной передачи данных, или для ситуаций, когда сотовая связь недоступна.

Последовательный интерфейс (Rx, Tx) использует контакты Rx и Tx на плате Ардуино для передачи данных по проводному соединению. Если достаточна низкоскоростная передача данных на короткие расстояния, то этот вариант может подойти. Однако он не подходит для ситуаций, когда требуется удаленная связь.

Таким образом, выбор варианта передачи зависит от конкретных требований приложения. Если измерения производятся в удаленной местности, где нет Интернета — оптимальнее GSM. При наличии Интернета и необходимости передачи данных на высокой скорости лучше использовать передачу по WiFi. Если данные передаются на небольшие расстояния и скорость передачи не обязательно должна быть высока — вполне подойдет последовательный интерфейс.

В модели Ардуино используется микроконтроллер Atmega328P (тактовая частота 16 МГц). Датчики, как и другие внешние устройства, могут быть подключены через порты входа—выхода [4]. В модели есть несколько видов памяти:

- Постоянная Flash-память — 32 КБ. Часть этой памяти используется загрузчиком, позволяющим осуществлять прошивку через USB с компьютера. Хранение программ — основная задача этого вида памяти.

- Оперативная память платформы — 2 КБ RAM-памяти. Это энергозависимая память, в которой все данные стираются при выключении питания.

- Аналог жесткого диска для Ардуино Уно — это энергонезависимая EEPROM-память (1 КБ).

Эту память используют для долговременного хранения. Содержимое этих ячеек памяти не стирается при выключении контроллера.

Датчик pH для измерения кислотности жидкости работает на основе потенциометрического метода анализа [5—7]. Щуп датчика можно увидеть на рис. 2 слева. Кроме щупа в этот модуль входит еще плата управления. Щуп сенсора выглядит как пластиковый цилиндр с двумя электродами на конце и наконечником в виде мембраны, наполненной буферным раствором с известным pH (рис. 3).

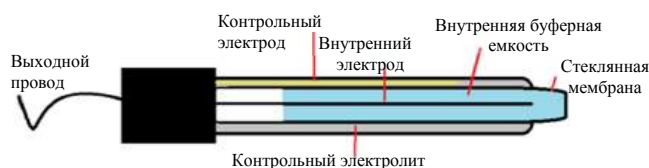


Рис. 3. Конструкция pH-метра

Первый электрод реагирует на ионы водорода (измерительный), а второй является вспомогательным (эталонным). В современных приборах измерительный электрод изготавливают из боросиликатного стекла, которому не страшны окислители. В этом случае его можно использовать в наиболее широком диапазоне pH. Индикаторный электрод в этом случае будет небольшим по габаритам, тонким и электропроводным. Равновесие между раствором и электродом устанавливается достаточно быстро (не более 2—3 мин).

Эталонный датчик чаще всего изготавливают из серебра (хлорида серебра).

Мембрана создает постоянную концентрацию ионов водорода H^+ на своей поверхности. Когда щуп погружается в жидкость, электроды на конце щупа измеряют разность потенциалов, которая создается в результате взаимодействия ионов водорода в жидкости с электродами. Ионы водорода в растворе начинают взаимодействовать с позитивно-заряженными ионами мембраны из стекла, создавая на ее концах электрохимический потенциал. Этот потенциал затем измеряется модулем электронного усиления, который для преобразования разности потенциалов в значение pH использует уравнение Нернста:

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \Pi a_i^{v_i},$$

где E — электродный потенциал;
 E° — стандартный электродный потенциал;
 R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К);
 T — абсолютная температура;
 n — число электронов, участвующих в процессе;

F — постоянная Фарадея, равная 96485,33 Кл·моль⁻¹;
 a_i — активность участников полуреакции;
 v_i — их стехиометрические коэффициенты (положительны для продуктов полуреакции (окисленной формы), отрицательны для реагентов (восстановленной формы)).

Плата управления обрабатывает данные, полученные от щупа, и отправляет их на Ардуино, где они могут быть использованы для управления другими устройствами.

В рамках исследования в устройстве реализован контактный способ определения электропроводности, по которому можно выявить количественное содержание солей в растворе (при пропускании электрического тока через раствор определяется проводимость, по которой судят о концентрации). В случае попадания в воду солей, щелочей или кислот, они начинают распадаться на ионы. Увеличение количества ионов приводит к усилению протекающего тока, по которому судят о концентрации. В ряде источников изложены доступные подходы измерения проводимости [8—10].

TDS-датчик (как и ЕС-метр) измеряет электрическую проводимость жидкости, которая пропорциональна суммарному количеству растворенных в воде примесей TDS на один миллион частиц воды. В предлагаемом устройстве в составе TDS-датчика измерительный щуп и плата управления (см. рис. 4).

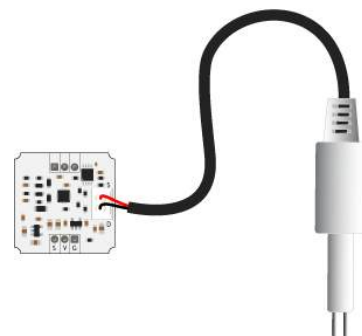


Рис. 4. TDS-метр и плата управления

Основной составной частью датчика-щупа является пластиковый герметичный корпус, который на конце имеет два электрода. При погружении в питательную смесь измеряется сопротивление между этими электродами. Это сопротивление обратно пропорционально электропроводности раствора или воды. Затем этот сигнал усиливается с помощью операционных усилителей и выпрямляется, перед выходом с платы.

При пропускании между электродами постоянного тока возможна неточность измерений из-за поляризации электролита. Поэтому предпочтительнее использовать переменный ток. Кроме того, переменный ток позволяет уменьшить погрешности измерений за счет того, что он сокращает влияние электродов на измерение, так как анод окисляется в процессе электролиза. В результате характеристики электрода меняются и через несколько недель его необходимо заново калибровать. Анодные электроды бывают двух типов: расходоуемые и нерасходоуемые (инертные). Активный анод окисляется, переходя в раствор в виде ионов, а инертный является электродом, через который в раствор передаются электроны. Инертные электроды обычно изготавливают из графита или платины. В нашем случае окисление анодного электрода — неизбежный процесс. Его можно замедлить периодическим изменением направления подачи положительного направления тока (катод и анод меняются местами). За счет этого окисление электродов замедляется. Поэтому переменный ток является предпочтительным методом для измерения электропроводности растворов в гидропонных системах.

Для разработанного проекта был написан программный код, необходимый для корректной работы датчика кислотно-щелочного баланса.

Фрагмент программного кода, отвечающий за работу датчика pH.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
float calibration_value = 21.34; // определим калибровочное значение
int phval = 0;
unsigned long int avgval;
int buffer_arr[10], temp;
void setup()
{
  // отображение на экране ЖК дисплея сообщения-приветствия
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" Welcome to ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" Circuit Digest ");
  delay(2000);
  lcd.clear();
}
void loop() {
  for(int i=0; i<10; i++)
```

```
{ // считываются 10 аналоговых значений, которые сохраняются в массиве
  // — это необходимо для сглаживания результата измерений.
```

```
  buffer_arr[i]=analogRead(A0);
  delay(30);
}
for(int i=0; i<9; i++)
{
  //сортировка принятых аналоговых значений по возрастанию. Это необходимо
  //для расчета скользящего среднего отсчета на более поздней стадии.
  for(int j=i+1; j<10; j++)
  {
    if(buffer_arr[i]>buffer_arr[j])
    {
      temp=buffer_arr[i];
      buffer_arr[i]=buffer_arr[j];
      buffer_arr[j]=temp;
    }
  }
}
avgval=0;
for(int i=2; i<8; i++)
  avgval+=buffer_arr[i];
float volt=(float)avgval*5.0/1024/6;
//рассчитаем среднее шести центральных отсчетов в аналоговых значениях
//определяем значение pH и выводим его на экран ЖК дисплея
float ph_act = -5.70 * volt + calibration_value;
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("pH Val:");
lcd.setCursor(8, 0);
lcd.print(ph_act);
delay(1000);
}
```

Заключение

Предложен вариант удаленного контроля питательной смеси для гидропонных установок на основе Ардуино. С учетом анализа возможностей Ардуино, конкретно решаемой задачи и материальных затрат произведен выбор компонентов. Среди датчиков, используемых в устройстве, — кондуктометр (датчик, показывающий электропроводность смеси и содержание солей в растворе). Так как при электролизе на аноде происходит окисление, через некоторое время необходима калибровка. Для такого класса установок предложен эффективный и экономичный способ увеличения времени работы без дополнительных калибровок.

Существенной проблемой для конструкций такого типа является изменение состава металла на щупах кондуктометра (появление оксидной пленки).

В результате датчик через некоторое время необходимо калибровать заново. Значительно снизить остроту проблемы можно периодическим изменением направления подачи положительного направления тока. То есть катод и анод периодически меняются местами (что представляет собой научную новизну). Реализовать это можно как программными методами, так и аппаратно. Хотя в разных отраслях народного хозяйства этот подход и используется, но в научных трудах эта проблема

не освещается, кроме того никто из производителей датчиков, используемых для гидропонных установок, не дает никаких рекомендаций по этому поводу.

Направление дальнейших исследований по теме, излагаемой в статье — изучение влияния разных вариантов переключения направлений тока между электродами ЕС метра (форма импульса, частота) с целью продления времени службы между калибровками.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Howard Resh.** Hydroponic Food Production a definitive guidebook of soilless food-growing methods: for the professional and commercial grower and the advanced home hydroponics gardener 6th ed. — USA: Newconcept Press, 2004. — 567 p.
2. **Чесноков В. А., Базырина Е. Н., Бушуева Т. М., Ильинская Н. Л.** Выращивание растений без почвы. — Л.: изд-во ЛУ, 1960. — 170 с.
3. **Аксенов В. И., Ушакова Л. И., Ничкова И. И.** Химия воды: Аналитическое обеспечение лабораторного практикума: учеб. пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 140 с.
4. **Блум Дж.** Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства. Изд. 2, пер. с англ. — СПб.: БХВ-Петербург, 2020. — 529 с.
5. Водородный показатель // Медицинская справочная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_medicine/6619/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9# (дата обращения: 29.03.2023).
6. **Неудачина Л. К., Петрова Ю. С., Лакиза Н. В., Лебедева Е. Л.** Электрохимические методы анализа : руководство к лаборатор. практикуму: учеб.-метод. пособие. — Екатеринбург: Изд-во урал. ун-та, 2014. — 136 с.
7. **Комиссаренков А. А., Пругло Г. Ф., Федоров В. А.** Потенциометрия: учеб.-метод. пособие. — СПб., 2013 — 64 с.
8. **Комиссаренков А. А., Пругло Г. Ф.** Кондуктометрия и высокочастотное титрование: учеб.-метод. пособие. — СПб., 2009. — 42 с.
9. **Первухин Б. С.** Развитие научно-методических основ проектирования кондуктометрических приборов контроля жидкостей и разработка технических средств их метрологического обеспечения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (05.11.13). — Барнаул: изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И. И. Ползунова, 2012. — 39 с.
10. **Шауб Ю. Б.** Кондуктометрия. — Владивосток: Дальнаука, 1996. — 488 с.

REMOTE QUALITY CONTROL OF NUTRIENT MIX FOR HYDROPONIC PLANTS

D. B. Petlenko

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

The article proposes a variant of remote control of the nutrient mixture for hydroponic installations based on Arduino. Taking into account the analysis of the capabilities of Arduino, the specific task being solved and the material costs, a choice of components was made. When using the device, after some time, the conductivity sensors need to be calibrated, since oxidation occurs at the anode during electrolysis. For this class of installations, an effective and economical option for cleaning the conductivity sensor from oxide films is proposed, which increases the operating time without additional calibrations.

Keywords: nutrient mixture control for hydroponic plants, tds conductivity sensors, tds sensor calibration, PH sensors.

Bibliography — 10 references.

Received May 17, 2023

УДК 539.421

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_45

EDN: HSMRVD

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА МИКРОТРЕЩИНЫ ДЕТАЛЕЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

¹ А. Т. Бердибеков, ² В. М. Юров, канд. физ.-мат. наук;

¹ В. В. Грузин, д-р техн. наук; ¹ А. В. Доля

¹ Национальный университет обороны имени Первого Президента Республики Казахстан — Елбасы, г. Астана, Казахстан

² Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан

Показано, что первичная нанотрещина в поверхностном слое металла толщиной около $R(l) \approx 2$ нм образуется за счет релаксации поверхности при его образовании и также имеет длину около $L_{nm} \approx 2$ нм. Этот процесс занимает 50—100 наносекунд. Далее нанотрещина превращается в мезотрещину с величиной $1/3$ скорости звука в металле и длиной $L_{um} = 10^2 L_{nm}$. Критическую длину макротрещин в металлах и сплавах нужно определять по формуле $L_c = 10^4 L_{nm}$. Показано, что влияние внешней среды на концентрацию и длину трещин в металле связано с его температурой, которая приводит деталь к коррозии, а давление и влажность среды не оказывают существенного воздействия.

Ключевые слова: нанотрещина, мезотрещина, железо, алюминий, титан, поверхность, военная техника.

Влияние внешней среды на детали военной техники обуславливается, в основном, процессом коррозии, обзор которой дан в работе [1]. Несмотря на множество процессов, которые протекают при коррозии (атмосферная, подземная, морская, биохимическая, межкристаллитная, питтинговая, контактная, щелевая, газовая, химическая и ряд других), исследования, связанные с ней продолжаются и в нашем столетии [2]. Это обусловлено тем, что коррозия начинается с поверхностного слоя, свойства которого отличны от свойств остального объема твердого тела [3]. Поверхностный слой металла, из которого состоят большинство деталей военной техники, содержит трещины размером долей микрона, которые обнаруживают рентгеновскими и электронно-микроскопическими методами [4, 5]. Именно по этим трещинам

происходит взаимодействие с внешней средой, приводящее к коррозии. Эти трещины назовем мезотрещинами, учитывая их размер.

Само понятие "мезоуровень" появился в начале прошлого столетия и был введен Ван Кампенем в 1981 г. [6]. Характерной длиной для мезоскопии является длина фазовой когерентности h_ϕ , которая может меняться в широких пределах, но в мезоскопии всегда $h_\phi \leq 10^{-6}$ м = 1 микрон. Характерным для мезоскопии является размер, а значит и количество частиц в образце (10^6 — 10^9). Мезоскопическими являются такие макроскопические тела, свойства которых определяют поведением одной микроскопической частицы [7]. Однако, сравнительно недавно во многих твердых телах в наносекундном диапазоне были обнаружены нанотрещины [8, 9]. Эти нанотрещины могут быть рассчитаны по нашей модели, описанной нами в работах [10, 11]. Они превращаются в мезотрещины после нескольких секунд или часов, т. е. в стационарном состоянии и обнаруживаются стандартными методами [4, 5]. Для наноструктур размером до 10 нм главную роль играют коллективные атомные процессы. Такие процессы и связанные с ними размерные эффекты наблюдаются только в наночастицах и наноструктурах [12].

Цель работы — показать как ведет себя первичная нанотрещина после ее зарождения и ее эволюция в металлических деталях военной техники во внешней среде.

Бердибеков Айдар Токтамысович, PhD, ассоциированный профессор, проректор НИР.

E-mail: berdibekovat777@mail.ru

Юров Виктор Михайлович, доцент.

E-mail: exciton@list.ru

Грузин Владимир Васильевич, профессор, заведующий кафедрой.

E-mail: gruzinvv@mail.ru

Доля Александр Валерьевич, докторант PhD.

E-mail: iskander_kst@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 мая 2023 г.

© Бердибеков А. Т., Юров В. М., Грузин В. В., Доля А. В., 2023

Нанотрещина в поверхностном слое металла

Поскольку в военной технике применяют железо (автомобили, оружейные стволы и снаряды и т. д.), алюминий (боевые самолеты, летательные аппараты и т. д.), титан (танки, бронетехника и т. д.), то рассмотрим эти металлы, а для их сплавов покажем, как производить расчеты. В [10, 11] для толщины поверхностного слоя $R(I)$ и для длины нанотрещины получено следующее выражение:

$$L_{nm} = R(I) = 0,17 \cdot 10^{-9} \nu = 0,17 \cdot 10^{-9} \cdot M / \rho. \quad (1)$$

Уравнение (1) задает один параметр — молярный объем элемента металла или соединения, который равен $\nu = M/\rho$ (M — молярная масса, ρ — ее плотность). Длина мезоскопической трещины $L_{\mu m} = 100 L_{nm}$. Отметим еще ряд параметров, которые будут необходимы в дальнейшем. В работе [13] показано, что поверхностная энергия объемного металла γ_2 с точностью до 3 % равна:

$$\gamma_2 = 7,8 \cdot 10^{-4} T_m, \quad (2)$$

где T_m — температура плавления металла (K).

В слое $R(I)$ нужно учесть размерный эффект, и поверхностная энергия слоя $R(I)$ становится равной γ_1 [11]:

$$\gamma_1 = \gamma_2 \left(\frac{1 - R(I)}{R(I) + h} \right) \approx 0,3 \gamma_2, \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, что поверхностная энергия слоя $R(I)$ в три раза меньше поверхностной энергии основного кристалла. Чтобы отделить слой $R(I)$ от остального кристалла, нужно затратить энергию, которая называется энергией адгезии [14]:

$$\begin{aligned} W_a &= \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \approx \\ &\approx \gamma_1 + \gamma_2 = 1,3 \gamma_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где γ_{12} — поверхностная энергия на границе раздела фаз, которая пренебрежимо мала в силу фазового перехода II рода [14].

Внутренние напряжения σ_{is} между фазами γ_1 и γ_2 можно просчитать по формуле [14]:

$$\sigma_{is} = \sqrt{W_a \cdot E / R(I)}, \quad (5)$$

где E — модуль упругости Юнга.

Для твердых растворов примем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} T_m &= \sum_{i=1}^n c_i (T_m)_i, \quad M = \sum_{i=1}^n c_i (M)_i, \\ \rho &= \sum_{i=1}^n c_i (\rho)_i. \end{aligned} \quad (6)$$

По формулам (1)—(5) рассчитаем указанные величины и представим их в таблице.

Физические параметры металлов Fe, Al и Ti

Элемент	Fe	Al	Ti
$L_{nm} = R(I)$, нм	1,21	1,70	1,79
$L_{\mu m}$, нм	121	170	179
γ_1 , Дж/м ²	0,471	0,243	0,505
W_a , Дж/м ²	1,884	0,971	2,021
E , ГПа	211	70	116
σ_{is} , МПа	18125	6325	11446

Из таблицы следует, что поверхностный слой представляет собой наноструктуру, где $R(I) \approx 2$ нм и длина первичной нанотрещины тоже равна $L_{nm} \approx 2$ нм.

Мезотрещина в поверхностном слое металла

По формуле (1) вычисляется длина нанотрещин в слое $R(I)$, которые прорастают в металле через ≈ 50 — 100 нс до размеров более $100R(I)$, причем наблюдается разброс по длинам нанотрещин. Обсудим этот вопрос подробнее, используя данные, представленные в таблице. По Гриффитсу предельная скорость распространения трещины равна [15, 16]:

$$V_C = \beta V_0 (1 - \gamma_1 / W_a)^{1/2} \quad (7)$$

и составляет около $1/3$ скорости звука V_0 в материале.

Для железа (основа большинства сталей) по формуле (1) длина нанотрещины при 2 нс $L_{nm} = 1,21$ нм, а длина микротрещины, измеренная электронно-микроскопическим методом, $L_{\mu m} = 0,2$ мкм [4], тогда $L_{\mu m}/L_{nm} = 0,2 \cdot 10^{-6}/1,2 \cdot 10^{-9} = 1,7 \cdot 10^2$, а скорость звука у железа $V_{Fe} = 5120$ м/с и $1/3 V_{Fe} = 1,7 \cdot 10^2$. Оба значения совпадают. Это значит, чтобы получить длину нанотрещин стали (и любых твердых тел) в стационарном режиме без приложенного внешнего напряжения необходимо значения из таблицы для L_{nm} умножить на 100 .

Иными словами, формула (1) приобретает вид:

$$L_{\mu m} = 0,17 \cdot 10^{-7} \nu. \quad (8)$$

Макротрещина при разрушении металлических деталей военной техники

Для разрушения твердого тела были разработаны силовые, деформационные и энергетические критерии разрушения. Между ними имеется следующая связь [17]:

$$\frac{K_{1C}^2(1-\mu^2)}{E} = 2\delta_{1C} \sigma_B = G_{1C} = J_{1C} = 2\gamma = W_a, \quad (7)$$

- где K_{1C} — критический коэффициент интенсивности напряжений, силовой критерий разрушения;
 E — модуль упругости;
 μ — коэффициент Пуассона;
 δ_{1C} — критическое раскрытие в вершине трещины, деформационный критерий разрушения;
 σ_B — предел прочности;
 G_{1C} — критическая интенсивность освобождающейся энергии, энергетический критерий разрушения;
 J_{1C} — критический джей-интеграл, энергетический критерий разрушения;
 γ — поверхностная энергия;
 W_a — энергия адгезии.

При этом

$$K_{1C} = \sqrt{EJ_{1C}}. \quad (8)$$

В случае пластины с трещиной L_C :

$$K_{1C} = \sigma_{is} \sqrt{L_C}, \quad \delta_{1C} = \frac{K_{1C}^2}{\sigma_{is} E}. \quad (9)$$

Сделаем оценку уравнениям (7), (8) и (9) для железа: $G_{1C} = J_{1C} = W_a = 1,884$ Дж/м² (см. таблицу); $K_{1C} = 19 \cdot 10^3$ Па·м^{1/2}, $(K_{1C})^2 = 361 \cdot 10^9$ (Па)²·м, $(1-\mu^2) = 0,91$; $\sigma_{is} = 18125 \cdot 10^6$ Па, $(\sigma_{is})^2 = 324 \times 10^{18}$ (Па)² (табл. 1); $L_C = (K_{1C})^2 / (\sigma_{is})^2 = 1,24 \cdot 10^{-9}$ м = 1,24 нм (табл. 1 — $L_{nm} = 1,21$ нм); $\delta_{1C} = 0,099 \times 10^{-9}$ м $\approx 10^{-10}$ м = 1 Å. Сравнение показывает в пользу нашей модели — формула (1). По данным работы [18] критическая длина трещин большинства металлов и сплавов лежит в пределах 30—50 мк, что намного больше нашего $L_{\mu m} \approx 0,2$ мк. Это связано с тем, что в авторском образце внутренние напряжения возникают при релаксации поверхности. В изделиях военной техники возникают напряжения, приводящие к росту мезотрещин в 100 раз. Это приводит к выводу, что

критическую длину трещин в металлах и сплавах нужно определять по формуле:

$$L_C = 0,17 \cdot 10^{-5} \nu = 0,17 \cdot 10^{-5} \cdot M / \rho. \quad (10)$$

Таким образом, чтобы найти теоретически критическую длину трещин в металлах и сплавах нужно знать ее химический состав и формулу (10).

Эксперимент с металлами Fe, Al, Ti

Разработанный авторами [19, 20] переносной комплекс измерения контактной разности потенциалов (КРП) на основе портативного цифрового осциллографа позволяет выполнять в непрерывном режиме неразрушающий контроль поверхности и длины трещин металлических деталей в процессе их производства, эксплуатации или ремонта. Нами были выбраны образцы железа, алюминия и титана, прослужившие определенный срок и имеющие определенную концентрацию микротрещин. Изменение сигнала КРП служит откликом на изменение концентрации или длины микротрещин.

На рис. 1 представлены зависимости КРП U образцов из Al, Ti, Fe от температуры t при прочих равных условиях: при давлении 997 ± 10 ГПа и относительной влажности воздуха 34 ± 2 %. Графики, представленные на рис. 1, построены методом наименьших квадратов по 14 значениям КРП, измеренной при температуре воздуха от 14 до 29 °C.

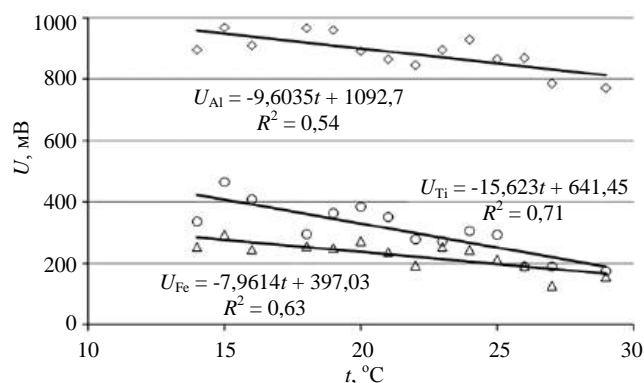


Рис. 1. Зависимость КРП от температуры:

◇ — Al; ○ — Ti; Δ — Fe

На рис. 1 также представлены формулы, описывающая данную зависимость $U(t)$ для Al, Ti и Fe, а также значение коэффициента детерминации R^2 . Уменьшение КРП U при увеличении температуры окружающей среды t может быть объяснено увеличением диэлектрической постоянной ϵ с увеличением температуры. Как видно из рис. 1, меж-

ду КРП U и температурой окружающей среды t имеется корреляция — высокая для Fe и Ti, и средняя для Al. Увеличение температуры окружающего воздуха приводит к следующему: во-первых, по формулам (1) и (10) с ростом температуры увеличивается плотность металла, а вместе с ней увеличивается длина микротрещины; во-вторых, с ростом температуры увеличивается скорость химической реакции металла с кислородом окружающей среды.

На рис. 2 представлены зависимости КРП U для образцов из Al, Ti и Fe от давления воздуха p при прочих равных условиях: при температуре воздуха $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и его влажности $(34 \pm 2)\%$. Графики, представленные на рис. 2, построены методом наименьших квадратов по 39 значениям КРП, измеренным при атмосферном давлении от 963 до 1013 гПа.

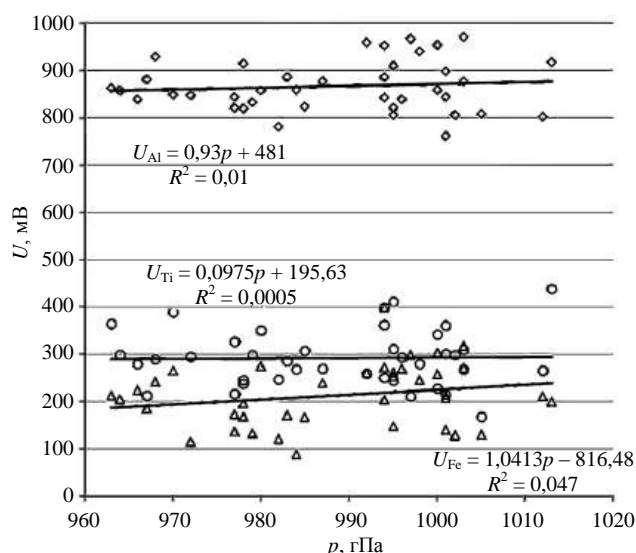


Рис. 2. Зависимость КРП U от давления воздуха p :
 \diamond — Al; \circ — Ti; Δ — Fe

Также на рис. 2 представлены формулы, описывающие зависимости $U(p)$ и коэффициенты детерминации R^2 . Из рис. 2 видно, что имеет место незначительное увеличение КРП U при увеличении атмосферного давления p , однако корреляция между ними мала. При нормальных атмосферных условиях влиянием на КРП атмосферного давления, по всей видимости, можно пренебречь. Однако необходимо отметить, что при измерении КРП при экстремально-низком атмосферном давлении, например, на большой высоте, КРП может уменьшаться более интенсивно. И тем более фактор влияния на КРП давления воздуха необходимо учитывать при проведении измерений КРП при искусственно сниженном (к примеру, в вакууме) или, напротив, при повышенном (например, при нагнетании воздуха) атмосферном давлении.

На рис. 3 представлены результаты анализа 69 сеансов исследований зависимости КРП U от относительной влажности воздуха χ при прочих равных условиях: при температуре воздуха $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении (997 ± 10) гПа.

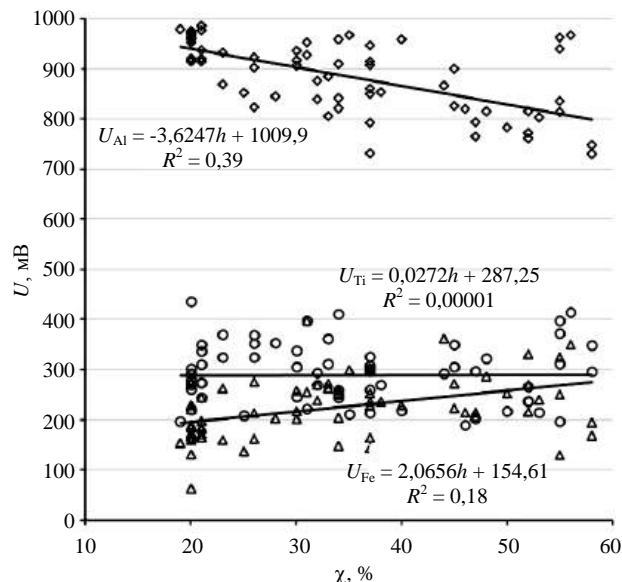


Рис. 3. Зависимость КРП U от относительной влажности воздуха χ
 \diamond — Al; \circ — Ti; Δ — Fe

Также на рис. 3 представлены формулы, описывающие зависимости $U(\chi)$, и коэффициенты детерминации R^2 , характеризующие взаимосвязь КРП и влажности воздуха. Из рис. 3 видно неоднозначную зависимость КРП U различных металлов от относительной влажности χ — прямую для Al и обратную для Fe с низкими коэффициентами детерминации R^2 . На КРП образцов из Ti изменение влажности воздуха χ влияния практически не оказывало ($R^2 \approx 0$).

Различие зависимостей КРП от относительной влажности воздуха — прямой для Al и обратной для Fe, может объясняться различными адсорбционными процессами на их поверхности при взаимодействии с водой. Для образцов из Al это взаимодействие акцепторное (приводит к уменьшению КРП), а для образцов из Fe — носит донорный характер, в итоге приводящее к незначительному увеличению КРП. Однако необходимо отметить, что измерения КРП проходили в относительно сухой воздушной атмосфере и можно предположить, что более высокая влажность воздуха может оказывать большее влияние на КРП. Итак, давление и влажность воздуха при нормальных атмосферных условиях не оказывают существенного влияния на величину КРП, в отличие от температуры, которая несколько изменяет относительную диэлектрическую проницаемость ϵ . Авторами проводились

измерения КРП в искусственно увлажненной атмосфере. При измерениях КРП при относительной влажности воздуха более 80 % СКО σ КРП резко увеличивалась. Достоверность измерений КРП снижалась.

Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).

Заключение

В статье показано, что трещины в металлах и других конструкционных материалах военной техники, впрочем, как и любого другого назначения, нужно исследовать в масштабной последовательности — первичные нанотрещины L_{nt} → мезотрещины $L_{\mu t}$ → макротрещины L_c . Только в такой последовательности можно узнать о необходимых мерах по условиям эксплуатации, хранения и ремонте деталей боевой техники, будь то танки, артиллерия или самолеты.

Данная научная статья опубликована в рамках выполнения научной программы программно-целевого финансирования на 2021-2023 годы ИРН № BR1090150221 "Разработка технологии защитных покрытий поверхностей вооружения и военной техники для защиты от агрессивных факторов окружающей среды и условий эксплуатации" (исследование финансируется

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В. В., Дуюнова В. А., Оглодков М. С., Фомина М. А., Французова Т. П., Козлов И. А. 90-летняя практика противокоррозионной защиты // Труды ВИАМ. 2022. № 6(112). С. 108—126.
2. Нечаев Ю. С. Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 7. С. 709—726.
3. Панин В. Е., Сергеев В. П., Панин А. В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий: учеб. пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2010. — 254 с.
4. Gottstein G. Physical Foundations of Materials Science. — Berlin: Springer, 2004. — 502 p.
5. Бетехтин В. И., Кадомцев А. Г. Эволюция микроскопических трещин и пор в нагруженных твердых телах // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 801—807.
6. Imry J. Introduction to Mesoscopic Physics. — Oxford University Press, 1997. — 248 p.
7. Москалец М. В. Основы мезоскопической физики. — Харьков: НТУ-ХПИ, 2010. — 180 с.
8. Веттегрень В. И., Пономарев А. В., Кулик В. Б., Мамалимов Р. И., Щербаков И. П. Разрушение кварцевого диорита при трении // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 35—50.
9. Веттегрень В. И., Пономарев А. В., Мамалимов Р. И., Щербаков И. П. Нанотрещины при разрушении олигоклаза // Физика земли. 2021. № 6. С. 87—92.
10. Юров В. М. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких кристаллов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2019. Вып. 11. С. 389—397.
11. Yurov V. M., Goncharenko V. I., Oleshko V. S., Sha Mingun. Anisotropy of the surface of carbon materials // Eurasian Physical Technical Journal. 2021. V. 18. Is. 3(37). P. 15—24.
12. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. — М.: Физматлит, 2005. — 416 с.
13. Рехвиашвили С. Ш., Кишტიкова Е. В., Кармокова Р. Ю. К расчету постоянной Толмена // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 2. С. 1—7.
14. Зимон А. Д. Адгезия пленок и покрытий. — М.: Химия, 1977. — 352 с.
15. Yurov V. M., Guchenko S. A., Laurinas V. Ch., Zavatskaya O. N. Structural phase transition in surface layer of metals // Bulletin of KarSU. Physics. 2019. № 1. P. 50—60. DOI: 10.31489/2019Ph1/50-60.
16. Kaminsky A. A., Kurchakov E. E. Modeling a crack with a fracture process zone in a nonlinear elastic body // International Applied Mechanics. 2012. V. 48. № 5. P. 552—562.
17. Ерасов В. С., Орешко Е. И. Причины зависимости механических характеристик трещиностойкости материала от размеров образца // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3(52). С. 56—64. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64.
18. Иванской В. А. Критические размеры трещин при разрушении металлов // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 7. С. 118—119.
19. Yurov V. M., Oleshko V. S. The impact of the environment on the contact potential difference of metal machine parts // Eurasian Physical Technical Journal. 2019. V. 16. № 1(31). P. 99—108.
20. Goncharenko V. I., Oleshko V. S., Yurov V. M. Determining the electron work function of metallic aircraft components from the contact potential difference // Russian Engineering Research. 2021. V. 41. № 10. P. 962—963.

THE INFLUENCE OF THE EXTERNAL ENVIRONMENT ON MICROCRACKS IN MILITARY EQUIPMENT PARTS

¹ A. T. Berdibekov, ² V. M. Yurov, ¹ V. V. Gruzin, ¹ A. V. Dolya

¹ National Defense University named after the First President of the Republic of Kazakhstan — Elbasy, Astana, Kazakhstan

² Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

It is shown that a primary nanocrack in a metal surface layer with a thickness of about $R(l) \approx 2$ nm is formed due to surface relaxation during its formation and also has a length of about $L_{nm} \approx 2$ nm. This process takes 50—100 nanoseconds. Further, the nanocrack turns into a mesocrack with a value of $1/3$ of the speed of sound in the metal and a length $L_{\mu m} = 10^2 L_{nm}$. The critical length of macrocracks in metals and alloys must be determined by the formula $L_c = 10^4 L_{nm}$. It is shown that the influence of the external environment on the concentration and length of cracks in the metal is associated with its temperature, which leads the part to corrosion, and the pressure and humidity of the environment do not have a significant effect.

Keywords: nanocrack, mesocrack, iron, aluminum, titanium, surface, military equipment.

Bibliography — 20 references.

Received May 10, 2023

УДК 658.5

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_51

EDN: HUDGWQ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАУЧНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ОЦЕНКИ, МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОДУКЦИИ

^{1,2} П. В. Рябчиков; ¹ М. А. Назаренко, канд. физ.-мат. наук

¹ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

² АО «Научно-производственное объединение «Техномаш» имени С. А. Афанасьева», Москва, Россия

Рассмотрены инструменты оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции на основе создания систем технологического обеспечения надежности продукции (изделий). Предложены практические инструменты построения систем технологического обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла продукции.

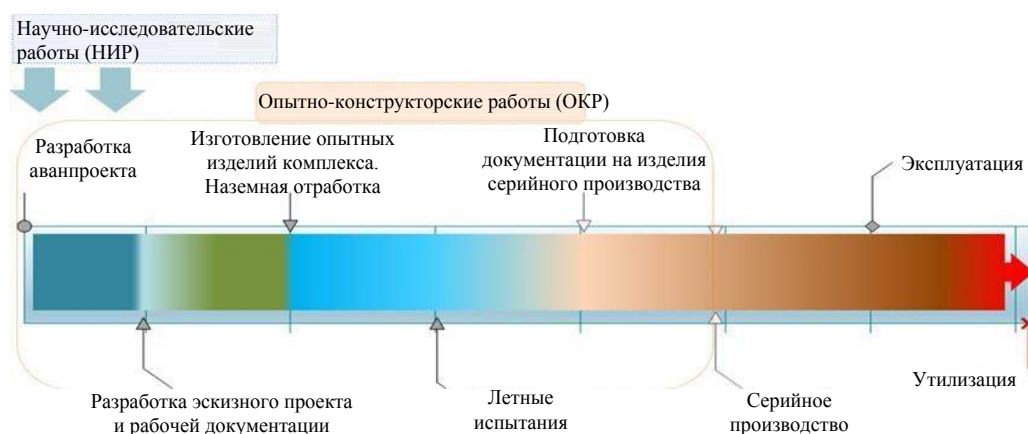
Ключевые слова: технологическая надежность изделия, контроль, качество, стабильность, надежность технологических систем.

Формирование систем технологического обеспечения надежности (ТОН) продукции — важная инженерная задача, выполнение которой позволяет существенно снизить риски в части обеспечении надежности создаваемой продукции [1].

Система ТОН должна функционировать на всех этапах создания продукции и всех стадиях жизненного цикла. Комплексное изучение закономерностей распределения отказов позволяет осуществлять прогнозирование надежности при разработке. Прогнозирование отказов технических систем (отказов средств технологического оснащения) позволяет прогнозировать надежность технологической системы. Прогнозирование

стабильности выполнения операций технологического процесса (измеримых параметров технологического процесса) позволяет прогнозировать технологическую составляющую надежности изделий [2]. Новым направлением работ является прогнозирование надежности человека-исполнителя и надежности системы "человек—машина".

В данной работе рассмотрены мероприятия по разработке систем ТОН на каждой стадии жизненного цикла изделий и инструменты оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции. Стадии жизненного цикла, согласно документам системы разработки и постановки на производство продукции, представлены на рисунке.



Стадии жизненного цикла изделий

Рябчиков Павел Вячеславович, аспирант, директор центра качества и технологической надежности.

E-mail: p.ryabchikov@tmnpo.ru pashzih@mail.ru

Назаренко Максим Анатольевич, заведующий кафедрой.

E-mail: nazarenko@mirea.ru

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2023 г.

© Рябчиков П. В., Назаренко М. А., 2023

Прогнозирование качества и надёжности продукции на стадии аванпроект

На стадии Аванпроекта (технического предложения) авторы предлагают проводить сравнительный анализ и выбор технических и технологических мер, направленных на обеспечение надёжности изделий и его элементов.

Выполняется анализ конструкции и разрабатывается перечень её критичных элементов, а также анализируются виды и последствия критичности отказов [3]. Осуществляется учет требований надёжности при обосновании выбора оптимальных конструктивно-технологических решений. Разрабатывается перечень научных исследований по технологическому обеспечению изделий с заданной надёжностью. Проводится предварительная оценка возможностей производственной базы для создания изделий с заданной надёжностью, определение состава и составление перечня потребного технологического оборудования.

На стадии Аванпроекта прогнозирование показателей качества и надёжности осуществляется методом аналогов. Рассматриваются создаваемые ранее изделия со схожими характеристиками или аналогичная производственная система.

Прогнозирование качества и надёжности продукции на стадии эскизного проекта

На стадии эскизного проектирования предлагается выполнить комплекс мер, направленных на обеспечение стабильности технологических процессов и их воспроизводимости. Также закладываются основы обеспечения технологичности монтажа, автоматизации процессов и нормы контролируемых параметров.

Осуществляется выбор материалов, элементов и режимов их использования, обеспечивающих требуемую надёжность изделий; выбор рациональных средств контроля и диагностирования при отработке, в производстве и эксплуатации изделий. Формируются требования по заданию показателей надёжности.

Проводятся разработка перечня и даётся обоснование работ и мероприятий по технологическому обеспечению изделий с заданной надёжностью, проводимых на последующих стадиях создания изделий. Уточняются состав и характеристики производственной базы, обосновывается достаточность технологического оборудования для создания изделий с заданной надёжностью.

Формируются требования на проведение научных исследований по технологическому обеспечению создания изделий с заданной надёжностью.

На основе перечней критичных элементов конструкции разрабатываются перечни критичных (особо ответственных) операций изготовления, технологических испытаний, сборки и контроля, подлежащих специальной проверке. Формируется порядок такой проверки.

Разрабатывается порядок подтверждения надёжности на последующих этапах создания изделий, в том числе разработка перечня методик обеспечения и контроля надёжности изделий в производстве.

На данной стадии целесообразно установить нормативные показатели надёжности, а также их методы контроля. До изготовления опытных образцов контроль показателей не проводится.

Прогнозирование качества и надёжности продукции на стадии разработки рабочей конструкторской документации

На стадии разработки рабочей документации на опытные образцы продукции необходимо проводить разработку рекомендаций по уточнению перечня критичных элементов, определение критичных параметров, обуславливающих критичность элементов. Обязательно устанавливаются требования к технологическим процессам, обеспечивающим выполнение критичных параметров.

Осуществляется разработка перечня параметров изделия, проходящих контроль на стабильность, и задание их предельных значений. Проводится оценка рабочей конструкторской документации на технологичность:

- анализ соответствия компоновок и членения вариантов конструкции изделия условиям производства;
- анализ соответствия компоновок и членения вариантов конструкции изделия условиям технического обслуживания и ремонта;
- сопоставление вариантов конструкции изделия по унификации, стандартизации, точности расположения и способам соединения составных частей изделия;
- оценка выбора вариантов конструкции изделия для дальнейшей разработки;
- анализ правильности выбора принципиальной схемы конструкции, обеспечивающей простоту компоновки изделия и технологичность;
- анализ рациональности конструктивных решений с точки зрения простоты изготовления;
- анализ обеспечения преемственности конструкции;
- анализ правильности расчленения изделия на составные части, обеспечивающие удобство обслуживания, монтажа и регулировки;

- обоснование выбора технологии и оценка степени ее реализуемости на существующей производственно-технологической базе.

Проводят работы по стандартизации и унификации. Осуществляют учет требований стабильности заданных параметров изделий в производстве при разработке рабочих технологических процессов, предусматривающих применение современных средств контроля качества изготовления. Составляют перечень специального технологического оснащения, испытательных стендов и контрольно-измерительных средств и задают требования к ним по надежности. Определяют порядок проведения отработки технологических процессов и подтверждения требований к надежности изделий.

Для подтверждения запланированных показателей надежности целесообразно провести априорный расчет надежности. До проведения расчета авторы рекомендуют оценить степень заимствования деталей, узлов и составных частей, имеющих подтверждения отработки, в том числе серийно изготавливаемых.

Прогнозирование качества и надёжности продукции на стадии изготовления и испытаний опытных образцов

На стадии изготовления и испытаний опытных образцов изделий система технологического обеспечения надёжности должна быть обеспечена комплексом мероприятий, например:

- корректировкой рабочей документации по результатам отработки;
- разработкой и реализацией планов подготовки производства;
- анализом причин отказов в ходе экспериментальной отработки, разработки мер по парированию отказов.

Проводят отработку изделий, проверку функционирования и ресурсные испытания. Выявляют и устраняются ненадежные изделия, недопустимые режимы и условия работы критичных изделий и ненадежных электрорадиоизделий, комплектующих изделий.

Выявляют операции технологического процесса, обеспечивающие выполнение требований конструкторской документации к критичным элементам в каждом изготовленном экземпляре. Устанавливают допустимые границы характеристик технологического процесса.

Проводят отработку технологии методами моделирования и планирования факторных экспериментов.

Проводят анализ завершенности отработки технологических процессов и технологичности изделий с оценкой достижения возможности получения заданных значений параметров критичных элементов в пределах конструкторской документации в каждом изготовленном экземпляре.

Для системы технологического обеспечения надёжности на этапе изготовления опытных образцов возможно провести исследование надёжности по упрощенной модели с применением:

- имитационных моделей технологического процесса;
- марковских методов;
- методов деревьев отказов.

Прогнозирование качества и надёжности продукции на стадии подготовки серийного производства

На стадии подготовки серийного производства система технологического обеспечения надёжности обеспечивается корректировкой технологической документации по результатам экспериментальной отработки и испытаний опытного изделия. Проводят уточнение достаточности объема контроля; устанавливают контрольные точки и вид контроля. Осуществляют изготовление (модернизацию) средств технологического оснащения, испытательных стендов и контрольно-измерительных средств с требуемой надёжностью, а также ведут непрерывную работу по совершенствованию технологического процесса и процесса организации производства в целях снижения затрат. Ещё недавно такая работа в рамках научной организации труда называлась — рационализаторская работа. Сейчас повсеместно используется философия бережливого производства и терминология *ISO*, где устанавливается требование постоянного улучшения. В методологии организации рабочего пространства *5S* также присутствует требование об улучшении.

Дополнительно проводят оценку надёжности оборудования и оснастки, стабильности основных параметров изделия по результатам подготовки изделия к серийному изготовлению и подтверждения их соответствия. Вводят требования к проверке соответствия оборудования, оснастки, испытательных стендов и контрольно-измерительных средств. Разрабатывают и реализуют мероприятия по повышению надёжности изделий.

Целесообразно провести оценку технологической составляющей надёжности расчетным методом на этапе подготовки производства. Затем подтвердить результаты, достигнутые расчетным методом экспериментально, при проведении отра-

ботки, внедрении и аттестации технологических процессов.

$$R_n \geq R_{\text{экс}},$$

где R_n — нормативное значение показателя надежности;

$R_{\text{экс}}$ — значение показателя надежности, полученное после внедрения технологического процесса

Обеспечение качества и надёжности продукции на стадии серийного изготовления

На этапе установившегося серийного производства система технологического обеспечения надёжности должна функционировать за счёт проведения ряда мероприятий:

во-первых, необходимо соблюдение объемов и периодичности контроля, контрольных испытаний;

во-вторых, обеспечение контроля (мониторинга) качества материалов, заготовок и комплектующих изделий, оказывающих влияние на надежность изделий;

в-третьих, постоянный учет и контроль стабильности основных параметров изделий и параметров технологического процесса, своевременное принятие решений при выходе показателей на граничные значения;

в-четвертых, своевременная реакция на несоответствия продукции, выявленные как при производстве, так и при эксплуатации. Внесение постоянных улучшений в конструкцию и технологию. Данные изменения должны быть направлены на снижение трудоёмкости работ, снижение себестоимости при обязательном сохранении (а в идеальном варианте — и повышении) достигнутых показателей качества продукции и измеримых показателей надёжности.

Основными элементами, подлежащими рассмотрению и анализу при контроле стабильности, являются параметры технологических процессов:

- входные параметры;
- неслучайные регулируемые параметры;
- случайные нерегулируемые параметры;
- выходные параметры.

Необходимо учитывать показатели качества изготовления за установленный период:

- процент сдачи продукции с первого предъявления;

- процент возвратов продукции;
- процент брака продукции, имеющей неустраняемые дефекты;
- доля (процент) дефектных деталей и сборочных единиц (ДСЕ) и продукции (в партии, потоке или в испытываемой выборке);
- процент выхода годных ДСЕ и готовой продукции (из числа запущенных в производство);
- уровень технологической дисциплины (определяемый по количеству операций без нарушения технологической дисциплины от общего количества проведенных операций) и стабильность технологической дисциплины;
- коэффициент ритмичности производства;
- процент принятых и (или) признанных рекламаций, сообщений о неисправностях, претензий за отчётный период.

Заключение

Новизна работы заключается в раскрытии малоизученных ранее инструментов обеспечения технологической составляющей изделия на стадиях жизненных циклов изделий. Стандарты серий "Надежность в технике" и "Система разработки и постановки продукции на производство" крайне редко затрагивают методы технологического обеспечения. Анализ документов по стандартизации и реализованные практические подходы позволили сформировать изложенные организационные методы построения систем технологического обеспечения надёжности.

Дальнейшим направлением работ предлагается считать систематизацию и обобщение технических методов обеспечения технологической надёжности. В современной литературе и в научных пособиях [4] предлагаются два основных метода: выбор материалов и ужесточение допусков на продукцию. При этом мало изучено влияние современных методов автоматизации производства и контроля, а развитие современных информационных систем позволяет осуществлять моделирование процессов с высокой долей достоверности [5].

На основе разработанных материалов авторы предлагают создать документы по стандартизации, устанавливающие основные организационные и технические методы по управлению технологической составляющей надёжности изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рябчиков П. В., Назаренко М. А.** Актуальные вопросы развития теории надежности. Технологическая надежность изделий // *Технология машиностроения*. 2022. № 7. С. 5—11.
2. **Рябчиков П. В., Лобастов М. М., Лобанов А. В. и др.** Технологическая или производственная надежность? Обоснование терминологии // *Вестник НПО Техномаш*. 2022. № 3(20). С. 36—39.
3. **Рябчиков П. В., Круглов И. А., Жуков В. В.** Анализ видов последствий и критичности отказов как фундамент для разработки перечня особо важных (ответственных), критичных (специальных) технологических процессов и операций // *Труды ФГУП НППАП. Системы и приборы управления*. 2021. № 1. С. 30—34.
4. **Павловская О. О.** Основы прикладной теории надежности: учеб. пособие. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет, Кафедра Системы автоматического управления. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. — 97 с.
5. **Холопов В. А., Назаренко М. А., Шмелева А. Н.** Обеспечение качества изготовления деталей на основе киберфизической информационно-управляющей системы: сб. науч. статей V междунар. науч.-практ. конф. "Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем РАДИОИНФОКОМ-2021". 15–19 ноября 2021 г. — М.: МИРЭА — Российский технологический университет, 2021. С. 551—553.

ENHANCING SCIENTIFIC TOOLS FOR ASSESSING, MONITORING AND FORECASTING PRODUCT QUALITY THROUGH THE ESTABLISHMENT OF TECHNOLOGICAL SUPPORT SYSTEMS FOR PRODUCT RELIABILITY

^{1, 2} *P. V. Riabchikov, ¹ M. A. Nazarenko*

¹ MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

² JSC "Afanasyev Research and Production Enterprise Technomac", Moscow, Russia

The paper considers the tools for assessment, monitoring and forecasting of product quality on the base of creating systems for technological support of product (article) reliability. Practical tools for building systems of technological support for reliability at the product lifecycle stages are considered.

Keywords: product technological reliability, control, quality, stability, technological system reliability.

Bibliography — 5 references.

Received April 4, 2023

УДК 621.396.962.21

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_56

EDN: IDMQNM

ВЕКТОРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОЙ РАЗВЕРТКИ

М. С. Костин, д-р техн. наук; *С. С. Шадинов*; *К. В. Латышев*; *Г. В. Коняшкин*; *А. С. Корчагин*
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

Проведен векторный S-параметрический анализ фазодинамических радиоизображений посредством формирования и численного анализа S_{21} -компоненты матрицы рассеяния квазистационарных и динамических сигнатур радиовизионных объектов. Определены ключевые достоинства апертурного захвата сигнальных радиоизображений методом частотно-синтезируемой функции спектральной плотности мощности (ФСПМ) рассеянного волнового радиопрофиля. На основе векторного анализатора цепей (ВАЦ) СВЧ-диапазона и широкополосных антенн типа "Вивальди" построена экспериментально-лабораторная установка сигнальной регистрации масштабно-временных радиоизображений в спектральной области 0,03...6,0 ГГц. Экспериментально установлены зависимости влияния углометрических характеристик объекта на спектрально-временную структуру формирования фазодинамических радиоизображений. В качестве масштабно-временной постобработки радиоизображений предложен метод кепстрального преобразования S-параметрических характеристик со сверткой базисных сигнатур в радиогеном облучаемого объекта. Получена серия кепстральных свертков фазодинамических радиоизображений, устанавливающая функциональную связь смены сигнатуры объекта во времени с его радиогеномом. Установлено, что воспроизводимость предложенного метода при отношении сигнал/шум 12 дБ составляет не менее 0,9.

Ключевые слова: радиоизображение, радиогеном, векторный S-параметрический анализ, фазодинамическая кепстральная свертка, динамическая сигнатура.

Современные программно-аппаратные технологии S-параметрического СВЧ-анализа открывают уникальные возможности для исследования перспективных направлений по созданию прикладных решений сигнального радиовидения, основанных на векторных методах, использующих принципы сканирующей (синтезируемой) спектрально-временной шаговой развертки [1]. Радио-

визионные системы с синтезированной ФСПМ представляют научно-практический интерес как при разработке исследовательских радиоволновых систем и приложений, так и при отладке средств радиосенсорной жестикуляции (РСЖ), идентификации объектов с динамической сигнатурой или неустойчивой эффективной площадью рассеяния (ЭПР). Как известно, основными средствами решения задач радиоволновой идентификации являются системы, использующие финитные сверхкороткие импульсы, в волновой деформации рассеянного поля которых содержатся сигнальные радиоизображения сигнатур. Однако получение ФСПМ методом частотного-временного синтеза позволяет оценить вклад отдельно взятой гармоники в формирование сигнального радиоизображения объекта в изолированных от влияния соседних частот условиях, что невозможно в случае СКИ-сигнала со сверхширокополосным (СШП) спектром. Кроме того, в системах радиовидения, синтезирующих ФСПМ сигнала с частотно-временной разверткой, отсутствует необходимость синхронизации фазы и поддержания динамического диапазона мощности излучения, а также учета влияния частотной дисперсии [1, 2].

Костин Михаил Сергеевич, доцент, заведующий кафедрой "Радиоволновые процессы и технологии".

E-mail: kostin_m@mirea.ru

Шадинов Сергей Семёнович, ассистент кафедры "Радиоволновые процессы и технологии".

E-mail: shadinov@mirea.ru

Латышев Кирилл Валерьевич, старший преподаватель кафедры "Радиоволновые процессы и технологии".

E-mail: latyshev@mirea.ru

Коняшкин Георгий Викторович, ассистент кафедры "Радиоволновые процессы и технологии".

E-mail: konyashkin@mirea.ru

Корчагин Александр Семёнович, лаборант кафедры "Радиоволновые процессы и технологии".

E-mail: korchagin@mirea.ru

Статья поступила в редакцию 28 мая 2023 г.

© Костин М. С., Шадинов С. С., Латышев К. В., Коняшкин Г. В., Корчагин А. С., 2023

Аналитическое описание векторного формирования фазодинамических радиоизображений

Одним из прототипных решений радиовизионной реализации получения фазодинамических изображений может являться ВАЦ, к которому подключены широкополосные узконаправленные антенны с калиброванной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

При этом объект радиовизионного исследования с неустойчивой сигнатурой, приемно-передающие антенны и материальная среда распространения сигнала для ВАЦ выступают в качестве СВЧ-эквивалента четырехполосника, представляемого в виде S -параметрической матрицы рассеяния, элементы которой сформированы соответствующими импульсными характеристиками [3, 4]. Основным, наиболее полно отражающим характер формирования фазодинамического радиоизображения, учитывающим распространение электромагнитных волн через среду и рассеянных сигнатурой объекта наблюдения, является параметр S_{21} , который представляет собой отношение принятого сигнала к излученному сигналу в зависимости от частоты, т. е. передаточную характеристику в пределах частотного диапазона 0,03—6,0 ГГц. Синтезированный излученный сигнал аналитически описывается следующими выражениями:

$$U_{\text{изл}}(n) = A_{\text{изл}} \exp(-j\omega_n t + \varphi_n) h_A, \quad (1)$$

$$U_{\text{изл}} = \sum_{n=0}^{200} \begin{bmatrix} \sigma(t - \Delta t n) A_{\text{изл}} \times \\ \times \exp(-j(\omega_0 + \Delta\omega n)t + \varphi_n) - \\ - \sigma(t - \Delta t(n+1)) A_{\text{изл}} \times \\ \times \exp(-j(\omega_0 + \Delta\omega n)t + \varphi_n) \end{bmatrix} h_A, \quad (2)$$

где $A_{\text{изл}}$ — амплитуда сигнала;

ω_n — угловая частота n -ой гармоники синтезируемого сигнала;

φ_n — фаза n -й гармоники;

h_A — импульсная характеристика антенны [4, 5].

При этом выражение (1) является описанием n -й гармоники синтезированного сигнала, а (2) представляет разнесенную по времени сумму N гармонических колебаний.

Учитывая импульсную характеристику среды, сигнатуры объекта и антенн, рассеянный сигнал будет иметь вид

$$U_{\text{отр}} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K k_n A_{\text{изл}} \exp(-j\omega_n t + \varphi_{nk}) h_A h_{\text{ср}} \quad (3)$$

где $k_n = \sqrt{\frac{P_{\text{изл}} D_1 D_2 \lambda_n^2}{(4\pi R)^2}}$, декремент затухания, опре-

деляемый для каждого дискретного значения частоты: $P_{\text{изл}}$ — мощность сигнала; λ_n — длина волны n -й гармоники синтезированного сигнала; D_1 и D_2 — коэффициенты направленного действия передающей и приемной антенн соответственно [5].

Протяженность среды распространения (радиоканала распространения) сигнала с синтезируемой ФСПМ в ходе эксперимента позволил пренебречь затуханием. Параметр S_{21} будет равен отношению принятого сигнала к излученному:

$$S_{21} = \frac{U_{\text{отр}}}{A_{\text{изл}} \exp(-j\omega_n t + \varphi_0) h_A} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K k_n A_{\text{изл}} \exp(-j\omega_n t + \varphi_{nk}) h_A h_{\text{ср}}}{A_{\text{изл}} \exp(-j\omega_n t + \varphi_0) h_A}. \quad (4)$$

Суммирование в выражении (4) по n обусловлено дискретным изменением частоты синтезированного сигнала в пределах диапазона 0,01—6,0 ГГц, по k — отражением гармоники синтезированного сигнала от массива элементарных плоскостей объекта, составляющих мгновенную сигнатуру. Геометрическая конфигурация и углометрические параметры объекта напрямую связаны с изменением ЭПР и картины фазодинамического распределения [6]. Топологию боковой поверхности объекта под разной сигнатурной конфигурацией (ракурсом) можно представить в виде суперпозиции плоскостей, каждая из которых находится на исходном расстоянии от антенны. В отличие от метода сигнального томографирования, построенного на квадратурном приеме при непрерывном зондировании, или импульсном режиме, где СКИ-сигнал используют для определения расстояния до объекта, путем расчета фазы или времени задержки, в предложенном методе регистрации радиоизображений используют принцип масштабновременного преобразования [7]. Так, характер локального убывания параметра S_{21} обусловлен приемом рассеянного сигнала с противоположной фазой (рис. 1), т. е. увеличением коэффициента стоячей волны (КСВ) и описывается выражением

$$\lim_{(\varphi_0 - \varphi_n) \rightarrow \pi(2n+1)} KCB = KCB_{\text{max}} \quad (5)$$

Выражение (5) для случая, не учитывающего затухание и переотражение, можно представить в виде

$$\lim_{(\varphi_0 - \varphi_n) \rightarrow \pi(2n+1)} S_{21} \rightarrow 0.$$

В реальных условиях равенство нулю параметра S_{21} не достигается, т. к. принимаемый сигнал с меньшей амплитудой и противоположной фазой при суммировании не компенсирует излученный сигнал, а также вследствие неполного поглощения объектом спектральных составляющих.

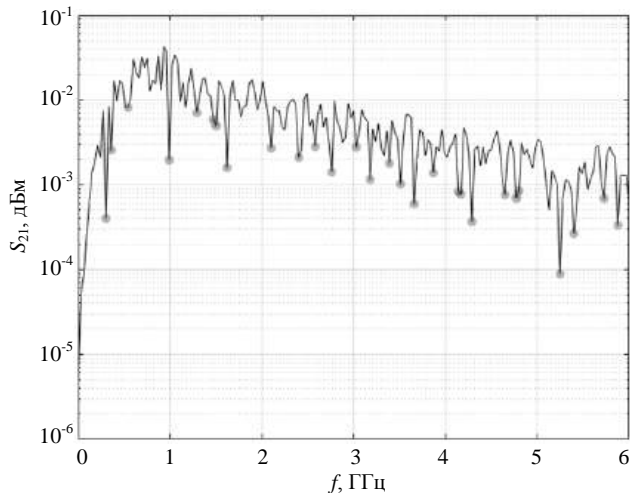


Рис. 1. Локальные минимумы функции S_{21} -параметра

Первая точка локального минимума передаточной функции определяет кратное половине длины волны λ_n расстояние между ближайшей отражающей поверхностью сигнатуры объекта и приемной антенной, соответственно. При этом данная зависимость будет выполнена для каждой поверхности в сигнатуре. В выражении (5) разность фаз, равная нечетному числу π , может достигаться при целых n , отсюда следует неоднозначность оценки конфигурации объекта, решаемая масштабнo-временным преобразованием (временным масштабированием), при котором структура геометрических зависимостей объекта не изменяется или путем использования фазированной антенной решетки [8]. Квазипериодичность характера формирования параметра S_{21} определяется кратностью длин волн λ_n , отвечающей выполнению условия выражения (5), и влиянием радиофизических (магнитодиелектрических) свойств материалов объекта.

Функция параметра S_{21} объекта, находящегося в некотором пространственном положении, является сигнатурой, соответствующей этому углометрическому состоянию. Число необходимых базовых сигнатур для идентификации с заданной вероятностью распознавания радиоизображения варьируются в зависимости от топологии профильной геометрии объекта наблюдения. Идентификацию радиоизображения с неустойчивой сигнатурой авторы предлагают производить с помощью кепстрального преобразования параметра S_{21} в область кепстрального времени.

Кепстральное преобразование параметра S_{21} выявляет масштабнo-временные зависимости в сигнатурной конфигурации объекта. Кепстр передаточной характеристики позволяет перейти во временную (пространственно-временную) область, в которой распределение положений максимумов относительно нуля будет соответствовать числу отдельных отражающих (рассеивающих) плоскостей объекта на соответствующей удаленности от приемной антенны, определяется выражением

$$K[q] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nq\right),$$

где $K[q]$ — дискретные отсчеты результата кепстрального преобразования;

$s[n]$ — отсчетные значения параметра S_{21} .

Массив отсчетных значений функции S_{21} сигнатуры помимо объекта наблюдения учитывает сцену материальной среды, в условиях которой происходит регистрация фазодинамического радиоизображения. Получение радиогеномов из сигнальных радиоизображений возможно при различных вариациях сцены неоднородной среды, влияние стационарного радиоизображения которой при анализе исключается. Так, свертка кепстров базовых сигнатур позволяет получить радиогеном, соответствующий объектам со схожими параметрами конфигурации и радиофизическими свойствами. Функция радиогенома G объекта формируется из совокупности базисных сигнатур следующим образом

$$G = K_1[q] K_2[q] \dots K_{N-1}[q] K_N[q],$$

где $K_n[q]$ — кепстр базовой сигнатуры;

N — число базисных сигнатур.

Описание и анализ экспериментальных исследований регистрации фазодинамических радиоизображений

Для проведения эксперимента построена стационарная испытательная лабораторная установка, состоящая из двух направленных антенн HE400UWB с рабочим диапазоном частот от 30 МГц до 6 ГГц и векторного анализатора цепей ZNLE6 с рабочим диапазоном 0,01—6,0 ГГц в режиме среднего формирования спектральной полосы развертки с шагом 1 кГц. Объект помещается между двумя антеннами, направленными к нему под углом 45°, после чего происходит фиксации значений S_{21} при отношении сигнал/шум 12 дБ (рис. 2, а).



а



б

Рис. 2. Экспериментально-лабораторная установка:
 а — структурная схема экспериментальной установки; б — общий вид лабораторного стенда

В ходе проведения исследования получены фазодинамические изображения беспилотного летательного аппарата (БПЛА), а также серия радиоизображений динамических сигнатур при РСЖ. Для регистрации фазодинамических изображений объект помещали на расстоянии до 50 см от направленных антенн, после чего происходила запись значений параметра S_{21} на электронный носитель с помощью встроенного USB-порта векторного анализатора цепей, для дальнейшей программной постобработки в программной среде Matlab.

Получение радиогенома БПЛА

В качестве экспериментального образца был выбран квадрокоптер DJI mini 2, представленный на рис. 2, б. При исследовании вращения объекта в выбранной плоскости сигнатуру объекта можно привязать к углу поворота. Базовыми сигнатурами были выбраны четыре положения, соответствующие углам поворота 0° , 45° , 90° , 180° . Парамет-

ры S_{21} для четырех базовых сигнатур беспилотника изображены на рис. 3.

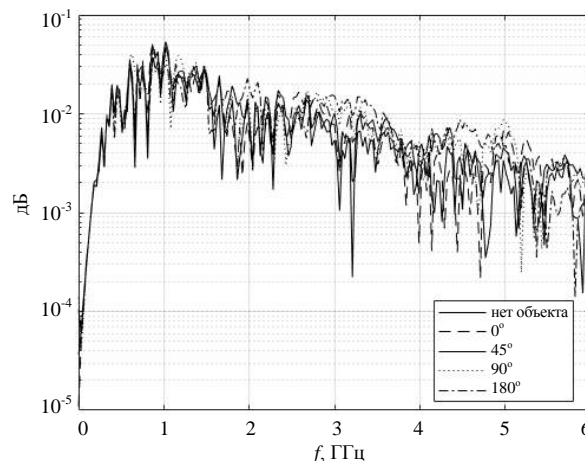


Рис. 3. Серия радио изображений базовых сигнатур беспилотника

На рис. 4. представлено радиоизображение сцены захвата S -параметрической матрицы рассеяния.

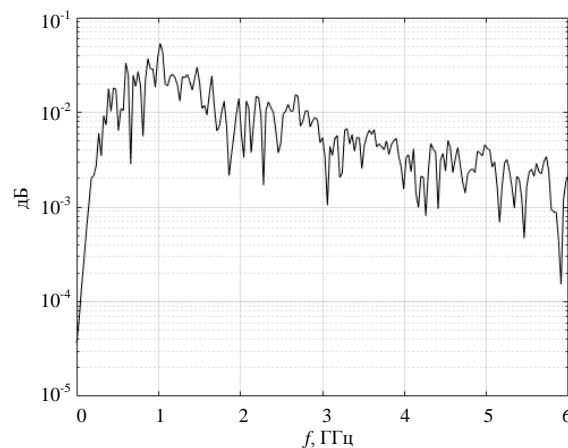


Рис. 4. Радио изображение S_{21} -функции сцены

Кепстры базовых сигнатур квадрокоптера представлены на рис. 5.

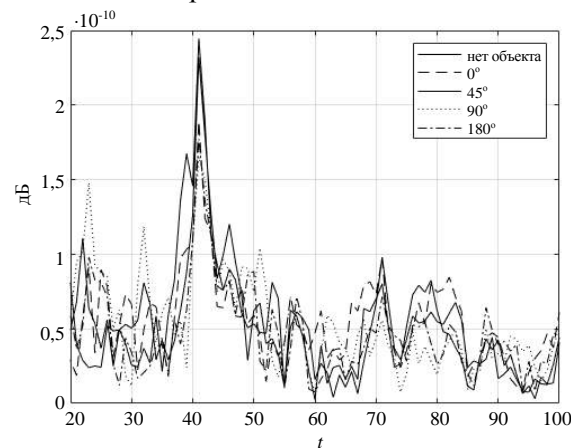


Рис. 5. Серия кепстров базовых сигнатур беспилотника

Радиограмом, как результат свертки кепстров базовых сигнатур беспилотника показан на рис. 6.

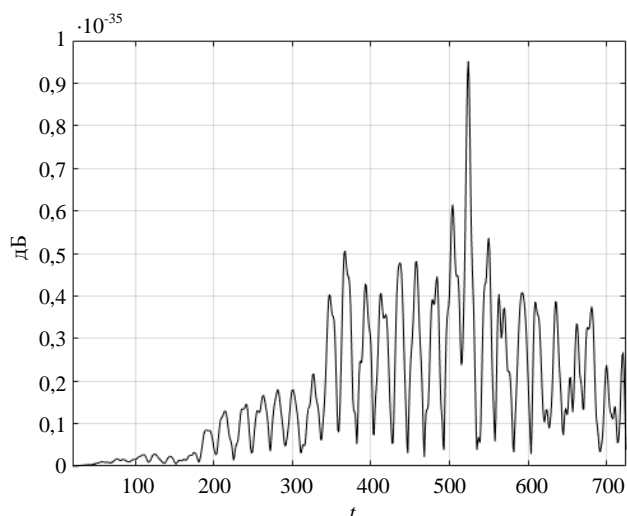


Рис. 6. Радиограмом (свертка кепстров базовых сигнатур беспилотника)

Формирование радиоизображений при РСЖ

В работе предложен векторный метод идентификации функциональной динамики изменения конфигурации, положения и смены сигнатур объектов, что позволяет получить более подробные сведения не только топологии объекта, но и о его радиофизических свойствах. В ходе эксперимента получены радиограммы для серии жестов (рис. 7).

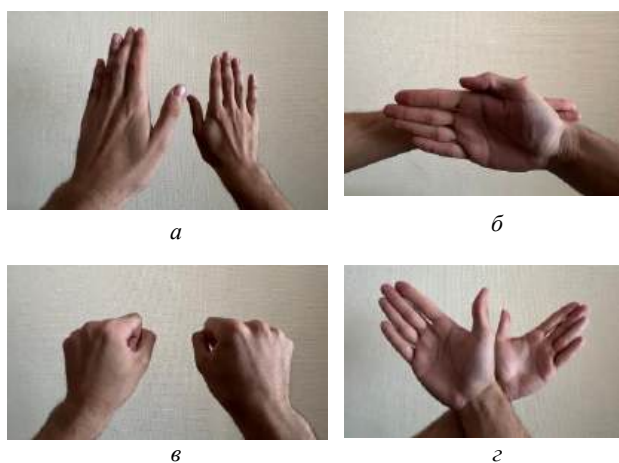


Рис. 7. Фотографическое изображение начальных фаз жестов, воспроизводимых операторами:

а — лопать; б — цикл; в — сжатие; г — ножницы

Лопать — попеременное приближение и удаление вдоль направления визирования открытых ладоней к антеннам; цикл — вращение открытых ладоней друг относительно друга, при котором они попеременно лежат в двух параллельных

плоскостях, перпендикулярных направлению визирования; сжатие — циклическое движение, представляющее собой синхронное сжимание в кулак и последующее раскрытие обеих рук оператора; ножницы — циклическое перекрестное перпендикулярное земной поверхности движение, относительно локтевой оси предплечий оператора.

Описанные сенсорные жесты управления проделаны двумя независимыми операторами с относительно разной скоростью и нестабильной динамикой движения, что необходимо для корреляционной оценки воспроизводимости идентичности (однозначности распознавания) по результатам постобработки радиоизображений.

Обратимся к анализу результатов исследования двух сетов РСЖ, представляющих наибольший интерес. Расположение рук, осуществляющих жесты, соответствует расположению БПЛА при захвате отсчетов передаточной характеристики S_{21} , т. е. дальности до 50 см от антенн по линии визирования.

На рис. 8 представлены серии радиоизображений и кепстральных преобразований фаз динамического жеста типа "лопасть", выполненные поочередно первым и вторым операторами, соответственно. При этом на рис. 9 приведено векторное представление соответствующих радиограммов — уникальных аутентификаторов радиосенсорного жеста, полученных на базе регистрационной статистики из N подходов распознавания радиосенсорного жеста независимыми операторами.

Аналогично, на рис. 10 и рис. 11 представлены серии радиоизображений и кепстральных преобразований фаз, а также радиограммы динамического жеста типа цикл, выполненные поочередно первым и вторым операторами, соответственно.

Важно отметить, что получена серия кепстральных свертки фазодинамических радиоизображений жестов устанавливает функциональную связь смены сигнатуры объекта во времени с его радиограммом. Так, при проведении оценки достоверности идентификации жестов за серию циклов получено 30 радиоизображений, для которых сформирована соответствующая выборка коэффициентов корреляции. По результатам исследования для достижения верификационной статистики N — число необходимых кадров необходимо выбирать в диапазоне не менее 30 из расчета 10 — для каждого независимого оператора. При этом относительное попадание корреляционной выборки (приведенное значение к N) в интервал справа от рассчитанного корреляционного ожидания (среднее значение выборки) является достоверностью воспроизводимости, оценочное значение которого в данной работе превышает 0,9.

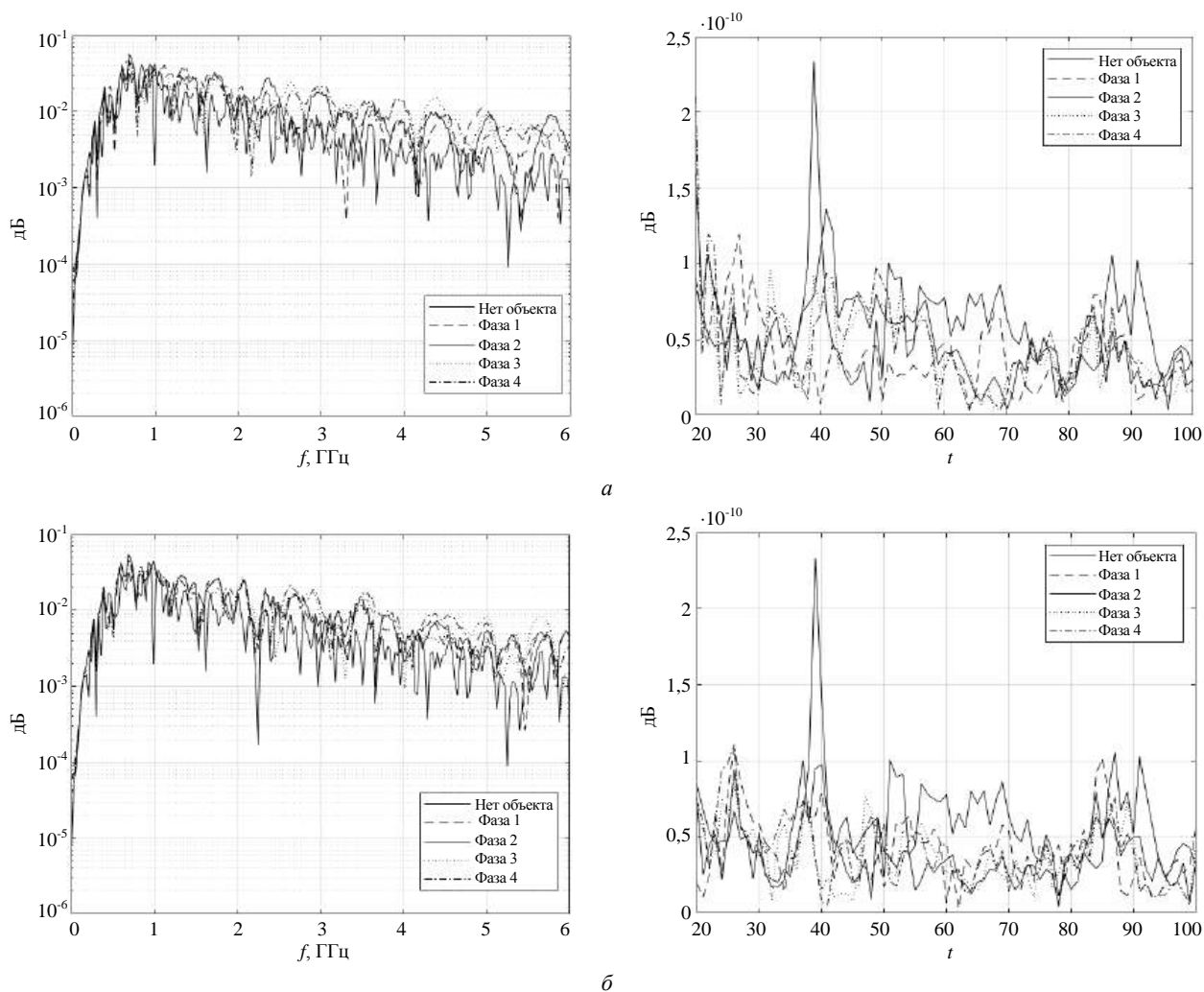


Рис. 8. Векторные радиоизображения жестикуляции типа "лопасть" (слева) и соответствующие им фазокендральные преобразования (справа), выполненные первым (а) и вторым (б) операторами

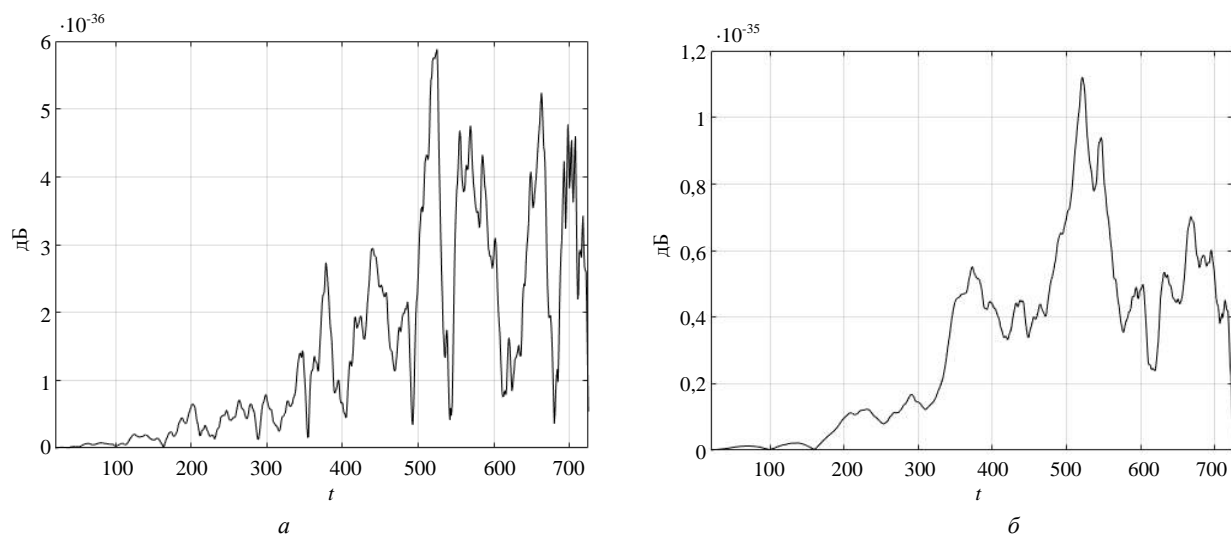
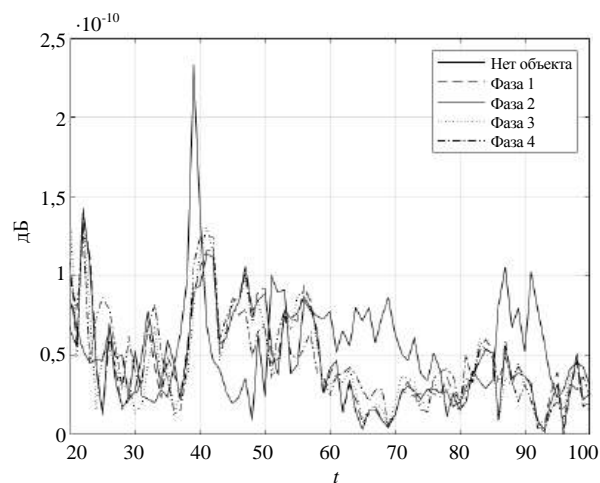
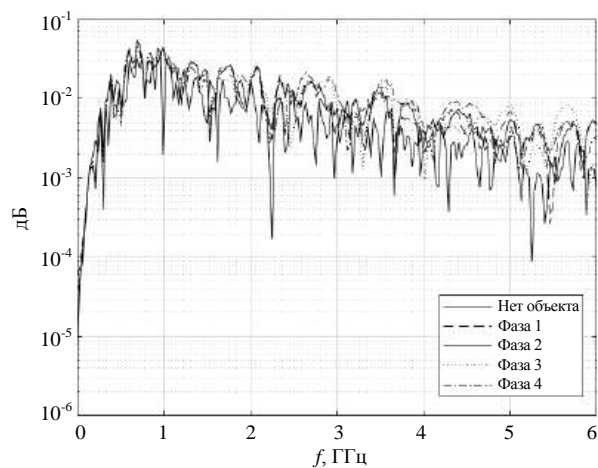
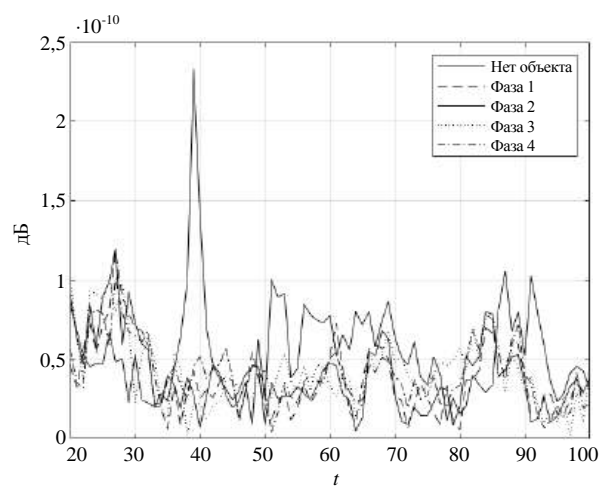
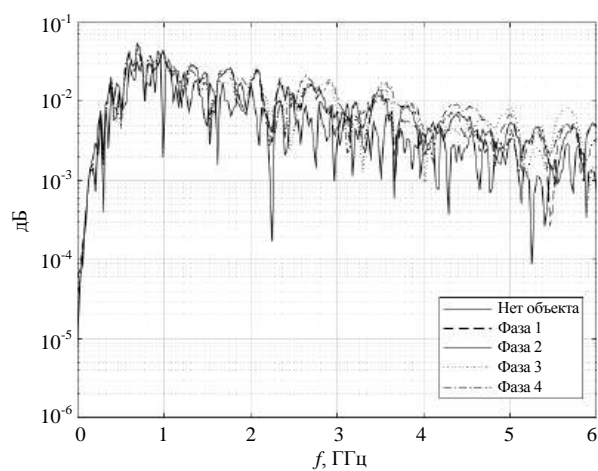


Рис. 9. Радиогеномные представление уникальных аутентификаторов радиосенсорного жеста типа "лопасть", выполненные первым (а) и вторым (б) операторами

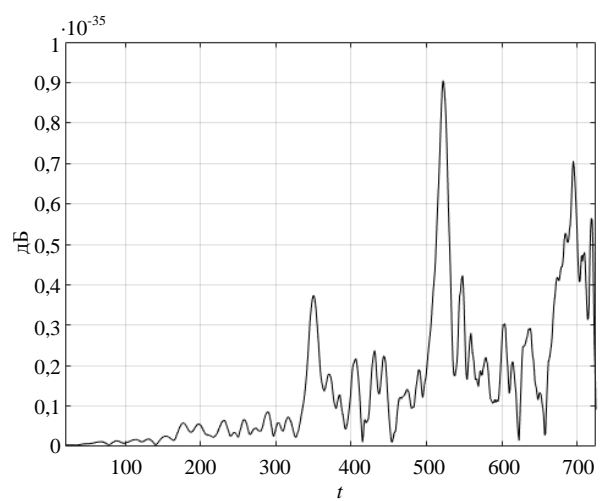
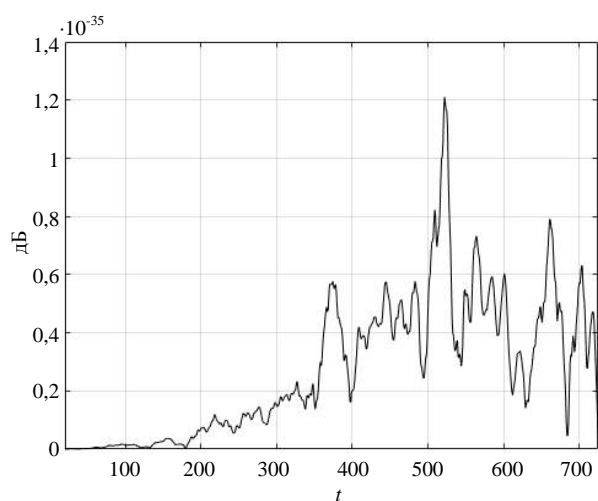


а



б

Рис. 10. Векторные радиоизображения жестикуляции типа "цикл" (слева) и соответствующие им фазокендральные преобразования (справа), выполненные первым (а) и вторым (б) операторами



а

б

Рис. 11. Радиогеномные представление уникальных аутентификаторов радиосенсорного жеста типа "цикл", выполненные первым (а) и вторым (б) операторами

Заключение

Предложенный в работе векторный метод S -параметрической регистрации сигнальных фазо-динамических изображений, а также программно-численный анализ радиоизображений на базе кепстральной масштабно-временной постобработки радиогеномов позволяют проводить регистрацию и распознавание сигнальных радиоизображений объектов с неустойчивой (переменной во времени) сигнатурой. Впервые получена серия кепстральных сверток фазодинамических радиоизображений, устанавливающая функциональную связь

смены сигнатуры объекта во времени с его радиогеномом. Предложенный алгоритм захвата и преобразования сигнальных радиоизображений в радиогеном динамически сменяемых сигнатур обеспечивает достоверность их распознавания с вероятностью не менее 0,9 при отношении сигнал/шум не менее 12 дБ.

Экспериментальная часть исследований проведена в рамках темы НИР "170-ИРИ" на базе учебно-научной лаборатории "Радиоволновых процессов и модулей СВЧ" Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА

ЛИТЕРАТУРА

1. Костин М. С., Бойков К. А. Радиоволновые технологии субнаносекундного разрешения: монография — М.: РТУ МИРЭА, 2021. — 142 с.
2. Куликов Г. В., Костин М. С., Петленко Д. Б., Ярлыков А. Д. Синтез и анализ радиоволновых систем временной трансформации нестационарных полей сигнального радиовидения субнаносекундного разрешения // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may20/3/text.pdf> (дата обращения: 28.05.2023).
3. Латышев К. В. Волновые технологии в системах сенсорной телеметрии (сигнального радиовидения) // Обобщенный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2023. № 1 (157). С. 53—57.
4. Шадинов С. С. Пространственная сверхширокополосная визуализация зондируемых объектов ближнего радионаблюдения // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul20/8/text.pdf> (дата обращения: 28.05.2023).
5. Куликов Г. В., Костин М. С. Идентификация одиночных сверхкоротких радиоимпульсов // Сборник научных статей IV Международной научно-практической конференции "Радиоинфоком-2019". М: РТУ МИРЭА, 2019. С. 123—127.
6. Куликов Г. В., Костин М. С. Регистрация и аутентификация нестационарных полей сверхкороткоимпульсных сигналов радиовидения субнаносекундного разрешения // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/2/text.pdf> (дата обращения: 28.05.2023).
7. Куликов Г. В., Костин М. С. Методы сверхкороткоимпульсной идентификации параметров материальных сред по конфигурации нестационарных полей в радиовидении // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/2/text.pdf> (дата обращения: 28.05.2023).
8. Куликов Г. В., Костин М. С., Замуруев С. Н., Ярлыков А. Д., Полевода Ю. А. Синфазная антенная решетка с электронно-регулируемой диаграммой направленности // Патент на полезную модель 217728 U1, 14.04.2023. Заявка № 2023102773 от 07.02.2023.

VECTOR FORMATION OF SIGNAL RADIO IMAGES BY SCANNING SPECTRAL-TIME SCANNING

M. S. Kostin, S. S. Shadinov, K. V. Latyshev, G. V. Konyashkin, A. S. Korchagin
MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

We consider the vector S -parametric analysis of the phase-dynamic radio images through the formation and numerical analysis of the S_{21} -component of the scattering matrix of quasi-stationary and dynamic signatures of radio-visual objects. The key advantages of aperture capture of radio signal images using the method of frequency-synthesized power spectral density function of the scattered wave radio profile are determined. On the basis of the vector circuit analyzer microwave range and broadband antennas such as "Vivaldi" built experimental-laboratory installation of signal capture of scale-time radio images in the spectral region of 0.03—6.0 GHz. The dependences of the influence of the angular characteristics of the object on the spectral-temporal structure of the formation of phase-dynamic radio-images are experimentally established. The method of cepstral transformation of S -parametric characteristics with convolution of basic signatures in the radiogenome of the irradiated object is proposed as a scale-temporal post-processing of radio-images. A series of cepstral convolutions of the phasodynamic radio images, establishing a functional connection between the object's signature change in time and its radiogenome, has been obtained. It was found that the reproducibility of the proposed method at signal/noise ratio of 12 dB is not less than 0.9.

Keywords: radio image, radiogenome, vector S -parametric analysis, phase-dynamic cepstral convolution, dynamic signature.

Bibliography — 8 references.

Received May 28, 2023

УДК 621.396

DOI: 10.52190/1729-6552_2023_2_64

EDN: IEWSKU

РЕАЛИЗАЦИЯ КОГНИТИВНОГО РАДИОПРИЕМА НА БАЗЕ USB RTL-SDR

А. К. Сгибнев, Д. А. Савин

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

Рассматривается аппаратная архитектура модуля радиомониторинга USB RTL-SDR и его программное управление, в программной среде MATLAB. Представлена реализация радиосканера, с настраиваемыми параметрами сканирования и обнаружения радиосигналов. Описана разработанная методика распознавания видов цифровых модуляций по форме сигнальных созвездий.

Ключевые слова: RTL-SDR, MATLAB, когнитивный радиоприем, радиомониторинг, распознавание модуляций, сигнальные созвездия.

Типовыми задачами когнитивных радиоприемных устройств являются достижение гибкости радиочастотного оборудования, которое может быть перепрофилировано и реконфигурировано к созданию единого интерфейса радиосвязи, управляющего большинством радиочастотных систем и универсализация оборудования радиоприема и радиомониторинга [1].

Для решения таких задач используются программно-определяемые радиосистемы, позволяющие без изменения аппаратной архитектуры производить прием различных сигналов различных типов.

Цель данной работы — реализация гибкой системы, способной к автоматическому обнаружению радиосигналов с задаваемыми пользователем параметрами обнаружения, и разработка методики распознавания видов цифровых модуляций по форме сигнальных созвездий.

Архитектура USB RTL-SDR

В качестве аппаратного обеспечения был выбран программно-определяемый USB RTL-SDR радиосканер на базе тюнера R820T и DVB-T COFDM демодулятора с встроенным контроллером USB 2.0 RTL2832U ввиду своей распространенности и доступности (см. рис. 1).

R820T — это высокоинтегрированный кремниевый тюнер, который включает в себя усилитель с низким уровнем шума (МШУ), смеситель, частичная ФАПЧ, перестройку коэффициента

усиления, регулятор напряжения и фильтр слежения, устраняя необходимость во внешних ПАВ фильтрах, МШУ, симметрирующее устройство и в линейных стабилизаторах напряжения. Благодаря архитектуре МШУ R820T предлагает самое недорогое и высокопроизводительное решение для цифрового телевидения. Встроенный линейный стабилизатор напряжения, высокопроизводительный МШУ и небольшой размер корпуса делают R820T идеальным решением как для приложений, чувствительных к стоимости, так и для приложений, чувствительных к шрифтовому коэффициенту [2].

Особенности:

- Поддержка всех стандартов цифрового телевидения: DVB-T, ATSC, DMB и ISDB-T.
- Недорогое встроенное приложение для цифрового телевидения.
- Соответствует стандартам EN 300 744, NORDIG 2.2, D-BOOK 7.0, ARIB B21, ABNT 15604, ATSC A74 и GB20600-2006.
- Соответствует стандартам EN-55020, EN55013 и FCC.
- Сверхнизкое энергопотребление < 178 мА.
- Одиночный источник питания 3,3 В.
- 2-проводной интерфейс I2C.
- 24-контактный 4x4 QFN бессвинцовый корпус.

RTL2832U — это демодулятор DVB-T COFDM, поддерживающий интерфейс USB 2.0. RTL2832U соответствует стандартам NorDig Unified 1.0.3, D-Book 5.0 и EN300 744 (спецификация ETSI). Он поддерживает режим 2К или 8К с полосой пропускания 6, 7 и 8 МГц. Параметры модуляции, например, кодовая скорость и защитный интервал определяются автоматически.

Поддерживает настройки на IF (промежуточная частота 36,125 МГц), low-IF (4,57 МГц) или Zero-IF на выходе с использованием кристалла 28,8 МГц.

Сгибнев Андрей Кириллович, магистрант.

E-mail: zgiba12345@mail.ru

Савин Денис Анатольевич, магистрант.

E-mail: denissatellit@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 31 мая 2023 г.

© Сгибнев А. К., Савин Д. А., 2023

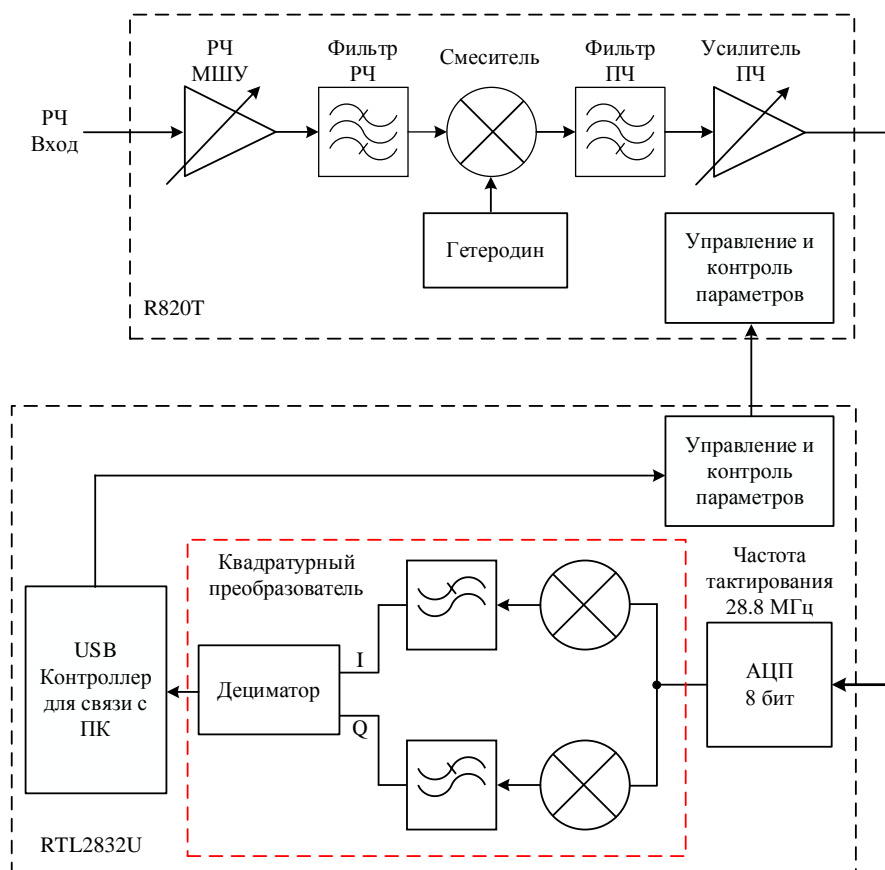


Рис. 1. Структурная схема USB RTL-SDR тюнера радиомониторинга

RTL2832U, оснащенный усовершенствованным АЦП (аналого-цифровым преобразователем), отличается высокой стабильностью приема в портативном режиме [3].

Особенности:

- COFDM соответствует стандартам Norig Unified 1.0.3, D-book 5.0 и ETSI 300–744.
- Поддерживает несколько частот IF (4,57 МГц или 36,167 МГц) и инверсию спектра.
- Поддерживает ввод с нулевым значением IF.
- Один недорогой кристалл для генерации тактовых импульсов (± 100 ppm).
- Автоматический режим передачи и определение защитного интервала.
- Схемы подавления импульсных помех.
- Автоматическое восстановление несущей в широком диапазоне смещений (± 800 кГц).
- Превосходная производительность с профилями предварительного / последующего / длительного эха.
- Встроенная схема подавления помех в соседнем и совместном каналах.
- АРУ с задержкой срабатывания и программируемой точкой переключения (ВВЕРХУ).
- 7-разрядный АЦП для измерения уровня радиосигналов.
- Аппаратные ПИД-фильтры MPEG-2.

- Инфракрасный порт для дистанционного управления и пробуждения, поддерживает следующие протоколы:

- Протокол Microsoft RC6.
- Протокол NEC, Sony, SIRC, RC-5.

- Восемь портов ввода-вывода общего назначения.

- Интерфейс USB 2.0:

- Поддерживает полную/высокоскоростную работу USB.
- Настраиваемая информация о поставщике с помощью внешнего EEPROM.
- Проходит сертификацию USB-IF.

- Требуется внешнее напряжение питания 3,3 В.
- 48-контактный QFN (6×6 мм²) корпус, соответствующий экологическим стандартам.

Реализация радиосканера на USB RTL-SDR

Для реализации управления и дальнейшей обработки информации полученной с RTL-SDR USB тюнера ключевым является использование Add-On'a — Communications Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio. Данное программное обеспечение представляет собой дополнительный пакет ПО для программной среды Matlab & Simulink, дающий возможность взаимодействовать с RTL-SDR USB-тюнером.

Листинг вызова RTL-SDR через Matlab:

Строка обращения к RTL-SDR — `sdr = comm.SDRRTLReceiver;`

Через нововведенную переменную "sdr" задаются параметры RTL-SDR тюнера:

`Sdr.RadioAddress = ...;` USB-адрес устройства RTL-SDR, с которым вы хотите установить связь, указанный в виде символьного вектора или строкового скаляра, представляющего неотрицательное целое число. Чтобы узнать какие радиостанции подключены к вашему компьютеру, воспользуйтесь функцией `sdrinfo`.

`sdr.CenterFrequency = ...;` Центральная частота в Гц, заданная как положительный скаляр. Допустимый диапазон этого свойства зависит от чипа тюнера устройства RTL-SDR.

`sdr.EnableTunerAGC = ...;` Выключение и включение АРУ, значениями 0 и 1 соответственно.

`sdr.TunerGain = ...;` Коэффициент усиления тюнера в дБ, заданный как скаляр. Допустимый диапазон этого свойства зависит от чипа тюнера устройства RTL-SDR. Эта настройка работает только при выключенном АРУ.

`sdr.SampleRate = ...;` Частота дискретизации.

`sdr.OutputDataType = '...';` "double" или "single" — комплексные значения масштабируются в диапазоне [-1, 1]. "int16" — Комплексные значения представляют собой необработанные 16-битные квадратурные выборки (I и Q) из устройства RTL-SDR.

`sdr.SamplesPerFrame = ...;` Количество выборок, заданное как положительное целое число.

`sdr.FrequencyCorrection = ...;` Коррекция частоты в ppm, заданная в виде целого числа от $-1e4$ до $1e4$. Это значение свойства корректирует сдвиг частоты в принимаемых данных из-за смещения частоты гетеродина или неточности тактовой частоты.

`sdr.EnableBurstMode = ...;` Параметр для режима пакетной передачи данных, указанный в качестве одного из этих числовых или логических значений.

0 (false) — Отключить режим пакетной передачи.

1 (true) — Включить режим пакетной передачи.

Чтобы создать набор непрерывных пакетов данных без переполнения устройства RTL-SDR. Включение режима пакетной передачи позволяет работать с моделями, которые не могут работать в реальном времени. Необходимо указать объем непрерывных данных, используя свойство `NumFramesInBurst` и свойство `SamplesPerFrame`.

`sdr.NumFramesInBurst = ...;` Количество фреймов в непрерывном пакете, заданное как положительное целое число.

Каждый из параметров вызывается при необходимости, в случае отсутствия вызова того или

иного параметра настройки RTL-SDR будет использовано стандартное значение параметра [4, 5].

В программной среде MATLAB был разработан скрипт управления и поиска радиосигналов с возможностью задавать полосу сканирования, шаг перестройки, частоту дискретизации приемника, количество отсчетов под необходимое RBW и выбором оконной функции для сканирования (рис. 2).

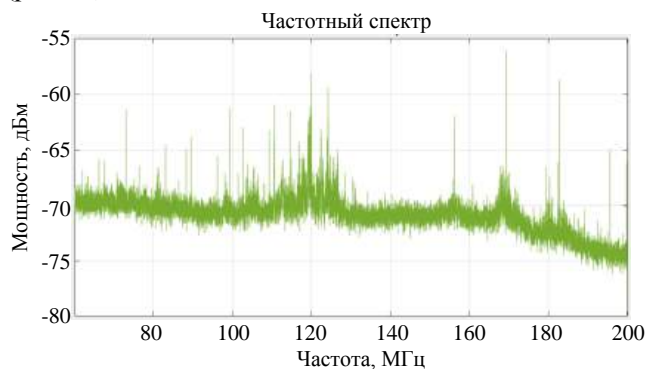


Рис. 2. График просканированного частотного спектра в диапазоне от 60 МГц до 200 МГц, с RBW = 60 Гц

Часть кода для ввода параметров сканирования:
`fc_min = 60e6;` % Минимальная частота в Гц
`fc_max = 200e6;` % Максимальная частота в Гц
`fc_step=100e3;` % Шаг перестройки частоты сканирования в Гц

`Fs = 2.048e6;` % Частота дискретизации в Гц
`N = 4096*2;` % Количество отсчетов в каждой итерации сканирования

`window = hamming(N,'periodic');` % Оконная функция Хэмминга

% Параметры SDR для работы с пакетом:
 % Communications Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio

`sdr=comm.SDRRTLReceiver;`
`sdr.CenterFrequency=fc_min;`
`sdr.EnableTunerAGC=1;` % АРУ включено
`sdr.SampleRate=Fs;`
`sdr.OutputDataType='double';`
`sdr.SamplesPerFrame=N;`
`sdr.FrequencyCorrection=0;`
`sdr.EnableBurstMode=0;`

Цикл для сканирования частотного спектра с заданными параметрами:

% Создаем массив для хранения спектра
`spec = zeros(1,N/2+1);`
`while sdr.CenterFrequency < fc_max`
`rx_data = sdr();`
`rx_data = rx_data .* window;`
 % Вычисляем спектр сигнала
`Y = fft(rx_data);`
`P2 = abs(Y/N);`
`P1 = P2(1:N/2+1);`
`P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);`

```
% Добавляем спектр к массиву
spec = spec + P1.^2;
sdr.CenterFrequency = sdr.CenterFrequency +
fc_step;
end
```

Во время сканирования алгоритм производит поиск сигналов с регулируемыми параметрами обнаружения, такими как: SNR и ширина полосы. Обнаружение сигнала происходит по максимумам в частотном спектре, полоса найденного сигнала определяется как -3 Дб от максимума, SNR высчитывается как отношение мощности максимума к среднему значению мощности в каждой итерации сканирования. Так как в эфире могут быть сигналы с угловой модуляцией или ее частными случаями, то возможен вариант с дублированием обнаружения одного сигнала. Для возможности избавления от такой ошибки распознавания, использовался критерий частотной близости обнаруженных пиков сигналов, иными словами, есть возможность пропуска записи найденных пиков, разнесенных на значения и примерно равные ширине спектра сигнала.

Листинг части кода, отвечающей за обнаружение радиосигналов:

```
% Обнаруживаем сигналы
[max_amp, max_idx] = max(fft_rx_dBm);
% Уровень шумов определяется как среднее
значение
noise_floor = mean(fft_rx_dBm);
noise_floor_W = 10^((mean(fft_rx_dBm)-30)/10);
max_amp_W = 10^((max_amp-30)/10);
snr = 10*log10(max_amp_W / noise_floor_W);
bw_idx = find(fft_rx_dBm > (max_amp - 3), 1,
'last') — find(fft_rx_dBm > (max_amp - 3), 1, 'first') + 1;
signal_bw = bw_idx*Fs/N;
signal_freq = freq(max_idx);
% Задаем параметры обнаружения
% порог SNR и минимальную ширину полосы
сигнала
if snr > 20 && signal_bw > 0.5e6
% проверяем на дублирование сигналов
duplicate = false;
for i = 1:length(found_signals)
if abs(found_signals(i).freq — signal_freq) < 0.5e6
duplicate = true;
break;
```

```
end
end
if ~duplicate
% сохраняем результат в массив found_signals
found_signals(end+1).freq = signal_freq;
found_signals(end).amp = max_amp;
found_signals(end).bw = signal_bw;
found_signals(end).snr = snr;
end
end
```

Далее сохраняется массив данных об обнаруженных радиосигналах, данные представляют собой: зафиксированный пик мощности, частоту зафиксированного при сканировании максимума мощности, отношение максимума мощности сигнала к среднему значению мощности в окне, принимается за значение отношения сигнал/шум, и ширина полосы сигнала по критерию -3 дБ от максимума.

Далее алгоритм производит перестройку центральной частоты радиоприемника на частоты обнаруженных сигналов с дальнейшим переносом на нулевую частоту и производит фильтрацию с частотой среза КИХ под ширину полосы обнаруженного сигнала (см. рис. 3).

Методика распознавания типов цифровых модуляций

Методика распознавания видов цифровых модуляций представляет собой построение области допустимых значений, представленных в комплексной форме, для различных типов цифровых радиосигналов.

Для возможности обнаружения вида цифровой модуляции берутся эталонные значения матриц сигнальных созвездий (рис. 4, 5) и производится сравнение принятых данных с эталонами, значение допустимых отклонений рассчитывают как радиус в окрестностях "идеальных" значений модулированного сигнала, расчет радиуса производят путем перевода значения допустимого ОСШ

из логарифмической шкалы $radius = \sqrt{10^{(-SNR/10)}}$.

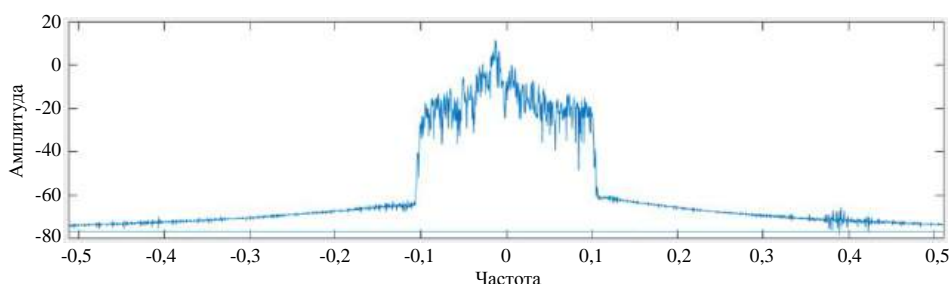


Рис. 3. График одного из обнаруженных сигналов в эфире после переноса на нулевую частоту и фильтрации

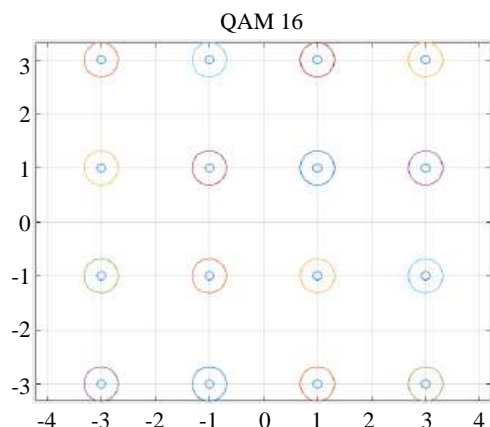


Рис. 4. График допустимых значений для 16-QAM сигнала

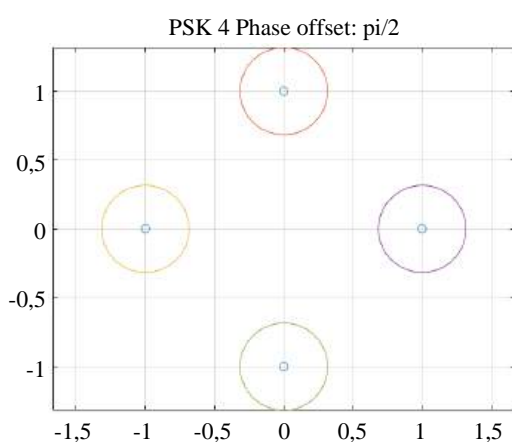


Рис. 5. График допустимых значений для 4-PSK сигнала с фазовой отстройкой равной $\pi/2$

ЛИТЕРАТУРА

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Р37 Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. Рембовского А. М. Изд. 3, перераб. и доп. — М: Горячая линия — Телеком, 2012. — 640 с. ISBN 978-5-9912-0236-7.
2. [Электронный ресурс] https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked1.pdf (дата обращения: 15.04.2023).
3. [Электронный ресурс] https://homepages.uni-regensburg.de/~erc24492/SDR/Data_rtl2832u.pdf (дата обращения: 15.04.2023).
4. Collins T. F., Getz R., Pu. D., Wyglinski A. M. Software-Defined Radio for Engineers. 2018. — 358 p.
5. The MathWorks, Inc. Communications Toolbox™ Support Package for RTL-SDR Radio 2014—2023. — 180 p.

IMPLEMENTATION OF A COGNITIVE RADIO RECEIVER BASED ON USB RTL-SDR

A. K. Sgibnev, D. A. Savin

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

The article discusses the hardware architecture of the USB RTL-SDR radio monitoring module and its software management in the MATLAB software environment. The implementation of a radio scanner is presented, with configurable parameters for scanning and detecting radio signals. The developed technique for recognizing types of digital modulations by the shape of signal constellations is described.

Keywords: RTL-SDR, MATLAB, cognitive radio reception, radio monitoring, modulation recognition, signal constellations.

Bibliography — 5 references.

Received May 31, 2023

Алгоритм проверяет наличие отснятых значений принятого сигнала попадающих в области допустимых значений, исходя из количества попаданий и наличия попаданий во все области, можно сделать вывод о типе модуляции исследуемого сигнала.

Разработанная методика позволяет распознавать виды модуляций, для которых возможно построение сигнальных созвездий отличных друг от друга.

Заключение

В данной работе были рассмотрены аппаратная архитектура одного из массовых программно-определяемых радиоприемников — USB RTL SDR, и основы управления им в программной среде MATLAB. Представлены основные части алгоритма сканирования радиоэффира с автоматизированным поиском радиосигналов и гибкой настройкой параметров сканирования и обнаружения. Представлена методика распознавания сигналов с цифровой модуляцией.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что разработанное программное обеспечение в связке с программно-определяемой радиоприемной системой может быть основой для реализации и решения задач когнитивного радиоприема.