

ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС — научно-техническому прогрессу России



- МАШИНОСТРОЕНИЕ



- ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

- СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ
И ИЗМЕРЕНИЯ



2'2021



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 (150) КОМПЛЕКС - научно-техническому прогрессу России

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1984 г.

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Спирягин В. В., Шовкалюк А. П., Чмыха-
ло А. И., Челноков А. В.* Разработка способа
ремонта трубных решеток теплообменных
аппаратов 3

Кобелев П. А., Дьячков М. Е., Шевченко Р. В.
Процессный подход в системе сервисного
обслуживания ВВТ ПВО СВ 8

Попов И. П. Резонансы и антирезонансы в
механических системах 14

ИЗМЕРЕНИЯ. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Волков В. Ф., Мосин Д. А., Пономарев А. С.
Исследование проблемы оценивания вклада
обеспечивающих подсистем в эффективность
применения целенаправленных организаци-
онно-технических систем 23

*Безкоровайный В. С., Яковенко В. В., Кресе-
люк Ю. В.* Влияние нагрузки на функцию

преобразования феррозондов при однополяр-
ном импульсном возбуждении 30

Монахов П. А. Качество автоматизирован-
ной системы как показатель эффективности
управления разработкой НИОКР по ее созда-
нию 34

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

Лушина Е. Ю. Физический поглотитель
солнечного излучения на основе гиперболи-
ческого метаматериала 42

*Пителинский К. В., Маковей С. О., Сиги-
да М. П.* Роботизированные бионические ап-
параты как средство эффективной реализации
управленческих решений в VUCA-мире —
изучение зарубежного военного опыта 49

Кабаков В. В. Использование сигналов ра-
дионавигационной системы NextNav 58

Главный редактор

И. А. Шерemet, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по научной работе

Заместители главного редактора

Ю. А. Чаплыгин, академик 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, академик РАН, д-р техн. наук, 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**, академик РАН, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ФГУП «ГосНИИАС»; **И. А. Каляев**, академик РАН, д-р техн. наук, 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. Контев, д-р техн. наук, проф., председатель научно-технического совета Госкорпорации «Ростехнологии»; **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. Обносов, д-р техн. наук, проф., действительный член РАН, генеральный директор — генеральный конструктор ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»; **В. В. Рыжаков**, 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

Учредитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»

Перепечатка материалов и использование их в любой форме, в том числе электронной, без предварительного письменного разрешения редакции не допускаются.

УДК 621.565+620.179.1

DOI: 10.52190/1729-6552_2021_2_3

РАЗРАБОТКА СПОСОБА РЕМОНТА ТРУБНЫХ РЕШЕТОК ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

В. В. Спириягин, канд. техн. наук; *А. П. Шовкалюк*, канд. техн. наук
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

А. И. Чмыхало, канд. техн. наук; *А. В. Челноков*, канд. техн. наук
Военная академия РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха, Московская обл., Россия

Разработан способ ремонта трубных решеток теплообменных аппаратов методом нанесения защитного покрытия на участки сопряжений трубных решеток и теплообменных трубок. Представлены сведения о разработанном программном обеспечении, позволяющем производить оперативный расчет компаунда, требуемого для проведения ремонта. Установлено, что применение разработанного способа и программного обеспечения позволяет производить нанесение защитного покрытия в основном на внутреннюю сторону трубных решеток теплообменника в условиях минимальных затрат термоотверждаемого компаунда.

Ключевые слова: теплообменные аппараты, трубные решетки, ремонт, защитное покрытие, компаунд, Matlab.

Анализ причин потери работоспособности теплообменных аппаратов и основных способов для их устранения

Одной из причин потери работоспособности теплообменных аппаратов (ТА) является возникновение локальных деформаций теплообменных труб, вызванных развитием дефектов вальцовочных соединений трубок в трубной решетке, приводящих к разгерметизации. Чаще всего такой вид дефекта встречается в ТА, у которых материал трубной решетки и трубок различен [1]. Кроме того, низкий коэффициент дефектоскопической технологичности ТА, характеризующийся наличием недоступных областей контроля, низкими эргономическими показателями, необходимостью применения порта-

тивных приборов и т. д., сильно затрудняет процесс проведения технического диагностирования. Особенности размещения ТА в глухих, темных помещениях существенно ограничивают возможности их ремонта.

В связи с этим вопросы, связанные с планированием и организацией проведения мероприятий по устранению зазоров в области вальцовки трубок в трубной решетке, приводящих к потере работоспособности ТА, являются актуальными.

Анализ технической документации [2] и открытой базы ФИПС позволяет выделить несколько основных способов ремонта ТА в зоне вальцовочных соединений трубок в трубной решетке.

Первый из них — способ ремонта трубок в трубных решетках в зоне их вальцовки путем выполнения довальцовки трубок с внешних сторон трубных решеток.

Недостатком данного способа является высокая трудоемкость мероприятий, связанных с вальцовкой всех трубок. Кроме того, после выполнения дополнительной вальцовки у исправных вальцовочных соединений возникают дополнительные напряжения, способные в дальнейшем привести к образованию дефектов и потере работоспособности.

Второй способ — ремонт трубок в трубных решетках ТА в зоне их вальцовки. Способ предусматривает предварительную обработку внутренней полости ТА дегазирующими рецеп-

Спириягин Валерий Викторович, преподаватель.

E-mail: V.V.Spiryagin@yandex.ru

Шовкалюк Алексей Петрович, профессор кафедры.

E-mail: shovalex@yandex.ru

Чмыхало Александр Игоревич, старший научный сотрудник.

E-mail: himoff2012@rambler.ru

Челноков Алексей Викторович, старший преподаватель.

E-mail: chelnokov-av@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2021 г.

© Спириягин В. В., Шовкалюк А. П., Чмыхало А. И., Челноков А. В., 2021

турами, снятие крышек с обеих сторон, рассверливание трубной решетки сверлильной машинкой и резцом с поперечной подачей или сверлом, наружный диаметр которого равен наружному диаметру трубки, но несколько меньше диаметра отверстия в решетке, с обеих сторон. Обрезанные концы трубок удаляют из решеток путем их сминания специальным приспособлением вручную или легким пневматическим молотком. Обрезанные трубки выталкиваются из пучка через одну из трубных решеток. На освободившееся место устанавливают другую трубку, и проводят вальцовку с соблюдением всех установленных требований и норм.

Недостатки данного способа — высокая трудоемкость и продолжительность мероприятий по ремонту, сложность извлечения высверленной трубки из внутренней полости ТА, необходимость производства и монтажа новых трубок взамен удаленных.

Прототипом предлагаемого способа, наиболее близким по достигаемому техническому результату, является способ защиты от коррозии и восстановления поверхности теплообменника [3], заключающийся в том, что в контур ТА вводят текучее вещество при температуре ниже его температуры отверждения с одновременной подачей в смежный контур, отделенный стенкой от контура с материалом покрытия теплоносителя, с температурой, равной или превышающей температуру отверждения материала покрытия, поддерживают температуру теплоносителя по меньшей мере до образования пленки отвержденного материала покрытия на поверхности разделяющей стенки, далее выводят теплоноситель из контура или понижают температуру теплоносителя ниже температуры отверждения материала покрытия и удаляют неотвержденный материал покрытия из контура.

Недостатками данного способа являются:

- большой расход отверждаемого материала (компаунда) (его требуется не менее, чем полный объем межтрубного пространства ТА);
- неравномерность нанесения защитного покрытия между трубками и трубной решеткой (нанесение защитного покрытия происходит на трубках раньше, чем на трубной решетке, вследствие особенностей характеристик материалов и геометрии конструктивных элементов);
- снижение эффективности ТА вследствие ухудшения показателей теплопроводности трубок ТА с нанесенным защитным покрытием (в зависимости от химического состава и толщины нанесенное покрытие в большинстве случаев обладает меньшей теплопроводностью, чем материал трубок ТА).

Разработка способа ремонта трубных решеток ТА

Задача исследования — создание способа, позволяющего наносить защитное покрытие на участки сопряжений трубных решеток и трубок ТА с устранением дефектов, в том числе дефектов вальцовочных соединений, при условии минимальных затрат термоотверждаемого компаунда, а также нанесения защитного покрытия в основном на внутреннюю сторону трубных решеток ТА с минимизацией отверждения покрытия на трубках ТА без снижения их эффективности.

Технический результат, на достижение которого направлен разрабатываемый способ, заключается в устранении дефектов и ремонте участков сопряжения трубных решеток и трубок ТА.

Сущность способа ремонта трубных решеток ТА заключается во введении в межтрубное пространство компаунда при температуре ниже температуры его отверждения, осуществлении нагрева температурой, равной или превышающей температуру отверждения, поддержании температуры нагрева по меньшей мере до образования пленки отвержденного компаунда (защитного покрытия) на внутренней поверхности трубных решеток, преимущественно на участках вальцовочных соединений трубных решеток и трубок, и выводе неотвержденного компаунда из контура ТА.

Новым в предлагаемом способе является то, что в целях снижения расхода компаунда и образования защитного покрытия преимущественно на участках вальцовочных соединений трубных решеток и трубок необходимо его нанесение выполнять с учетом следующих особенностей: перед введением компаунда требуется поднять сторону ТА, противоположную первой трубной решетке, на которую наносят покрытие, на установленный для конкретных условий эксплуатации и особенностей конструкции ТА угол; введение жидкого компаунда в межтрубное пространство требуется проводить в количестве, предварительно рассчитанном в зависимости от угла подъема и минимально необходимого объема для образования покрытия с внутренних сторон трубных решеток; после образования покрытия на первой решетке требуется вернуть теплообменный аппарат в исходное положение и повторить операции нанесения покрытия на второй (противоположной) трубной решетке.

Сравнительный анализ показал, что предлагаемый способ отличается от наиболее близкого по технической сущности способа защиты от коррозии и восстановления поверхности теплообменника [3] в первую очередь тем, что осу-

существляется подъем одной стороны ТА на установленный угол, во-вторых, проводится предварительный расчет необходимого количества жидкого компаунда. Это в совокупности приводит к экономии расходных материалов и нанесению защитного покрытия в основном на внутреннюю сторону трубных решеток ТА при минимизации наличия отвержденного покрытия на трубках ТА.

Способ может быть реализован следующим образом.

1. Провести подготовительные работы (отключить ТА от системы, снять крышки, демонтировать крепежные к основанию помещения элементы ТА). При помощи заглушки 1 (см. рис. 1) закрыть сливной патрубок 2 межтрубного пространства ТА.

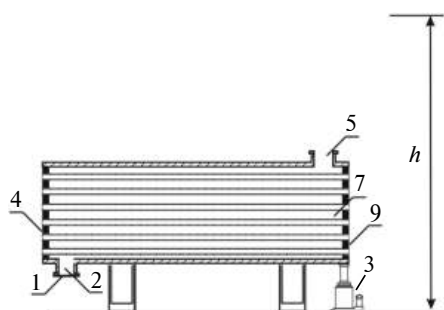


Рис. 1. Схема исходного положения при реализации способа ремонта трубных решеток ТА

2. При помощи домкрата 3 или иного приспособления, обеспечивающего выполнение заданной функции подъема, приподнять из исходного положения сторону ТА, противоположную первой трубной решетке 4, на которую наносят покрытие, на угол α (рис. 2), предварительно

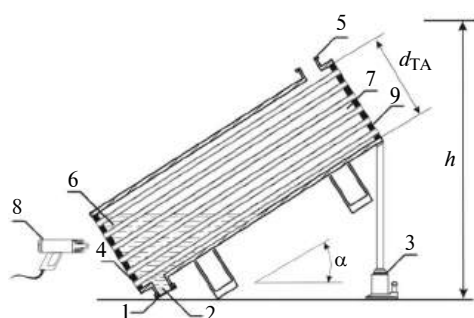


Рис. 2. Схема реализации способа ремонта трубных решеток ТА при нанесении защитного покрытия на одну трубную решетку

определенный для условий эксплуатации (высота h свободного пространства над ТА, размеры помещения и т. д.) и конструктивных ограничений подъема конкретного ТА (наличие ограничивающих подъем элементов, невозможность подъема ТА на определенный угол вследствие

вероятности снижения конструкционной прочности и т. д.):

$$\alpha = f(p_{1ЭК}, p_{2ЭК}, \dots, p_{mЭК}, k_{1ТА}, k_{2ТА}, \dots, k_{nТА}), \quad (1)$$

где $p_{1ЭК}, p_{2ЭК}, \dots, p_{mЭК}$ — 1-й, 2-й, ..., m -й параметры условий эксплуатации, ограничивающие подъем стороны ТА на угол α ;

$k_{1ТА}, k_{2ТА}, \dots, k_{nТА}$ — 1-й, 2-й, ..., n -й параметры ТА, ограничивающие подъем его стороны на угол α .

3. Ввести через конструктивный элемент (например, фланцевое соединение заливного патрубка 5) жидкий компаунд 6 в межтрубное пространство 7 ТА в минимальном количестве (объем V_k), предварительно рассчитанном в зависимости от установленного угла подъема α и геометрических размеров ТА (диаметр трубной решетки $d_{ТА}$) при условии осуществления покрытия с внутренних сторон трубных решеток:

$$V_k = f(\alpha, d_{ТА}). \quad (2)$$

В качестве компаунда можно использовать жидкое термоотверждаемое вещество, которое при повышении температуры превращается в неплавкое, нерастворимое защитное покрытие, например эпоксидную смолу (ЭС) в сочетании с отвердителем на основе модифицированных алифатических аминов, в присутствии которых отверждение происходит при сравнительно низких температурах (20—100 °С) [3].

4. После наполнения ТА нужным объемом компаунда осуществить нагрев внешней стороны трубной решетки на величину температуры отверждения компаунда термопистолетом 8 или любым другим приспособлением, обеспечивающим подачу контролируемого теплового потока, до образования с внутренней стороны трубной решетки защитного покрытия. Время нагрева определяют физико-химические характеристики компаунда и требуемая толщина наносимого покрытия.

5. По истечении установленного времени нагрева вернуть ТА в исходное положение (см. рис. 1).

6. Провести операции 2, 4, 5 в целях нанесения покрытия на вторую трубную решетку ТА 9.

7. Открыть заглушку 1 и удалить неотвержденный компаунд из межтрубного пространства самотеком через конструктивный элемент (например, фланцевое соединение 2) с последующей продувкой (например, через фланцевое соединение 5).

8. Осуществить сборку ТА, монтаж крепежных к основанию помещения элементов ТА и

другие операции подготовки ТА к применению по назначению.

На разработанный способ подана заявка на получение патента на изобретение [4].

Расчет объема (количества) компаунда, требуемого для проведения ремонта трубных решеток ТА

При проведении расчета количества компаунда, которое при подъеме одной из сторон теплообменника на угол α потребуется для полного покрытия внутренней стороны трубной решетки, противоположной поднимаемой, необходимо учитывать объем межтрубного пространства, занятого теплообменными трубами:

$$V_k = V_{м.п} - V_m, \quad (3)$$

где V_k — расчетное значение объема компаунда;

$V_{м.п}$ — объем межтрубного пространства, обуславливаемый геометрическими размерами обечайки;

V_m — объем межтрубного пространства, занятый теплообменными трубами.

Геометрически объем компаунда при проведении ремонта предлагаемым способом можно представить в виде усеченного цилиндра с перфорацией (рис. 3). Нахождение объема такой фигуры сводится к вычислению определенного интеграла. Данный расчет является достаточно трудоемким, так как для интегрального исчисления необходимо определить площади всех поперечных сечений в направлении OX .

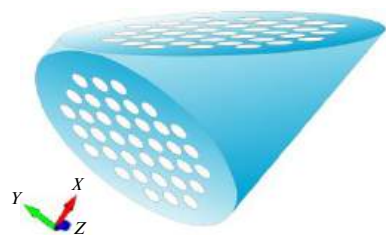


Рис. 3. Объем теплообменника, занятый компаундом

Для проведения оперативных расчетов разработана программа в среде Matlab [5], исходными данными для работы которой являются паспортные значения диаметра трубной решетки (диаметра обечайки) $d_{ТА}$, количество труб в трубном пучке теплообменника n и их диаметр $d_{тр}$, а также значение угла подъема теплообменника α_1 .

При подъеме теплообменника на угол α_1 и заполнении межтрубного пространства таким образом, чтобы жидкость полностью покрывала всю поверхность трубной решетки со стороны противоположной поднимаемой (рис. 3), объем

межтрубного пространства, занимаемый жидким компаундом, без учета объема межтрубного пространства, занятого теплообменными трубами, рассчитывают с использованием формулы для расчета объема усеченного цилиндра:

$$V_{м.п} = \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) \pi r^2, \quad (4)$$

где h_1 — высота наименьшей стороны цилиндра ($h_1 = AB$; см. рис. 4);

h_2 — высота наибольшей стороны цилиндра ($h_2 = BC$);

r — радиус трубной решетки

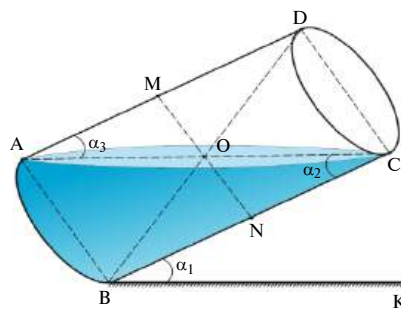


Рис. 4. Схема заполнения компаундом межтрубного пространства ТА при проведении ремонта трубной решетки

В целях проведения ремонта заполнение компаундом осуществляется таким образом, чтобы он полностью покрывал всю площадь трубной решетки, т. е. до достижения уровнем жидкости диагонали AC (см. рис. 4). В таком случае высота $h_1 = AB = 0$. Из паспортных данных на ТА, зная диаметр трубной решетки ($d_{ТА} = AB$), с учетом того, что $\triangle ABC$ — прямоугольный, определяют высоту $h_2 = BC$ с использованием тригонометрической функции:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \left(\frac{AB}{BC} \right) \Rightarrow BC = \left(\frac{AB}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right); \quad (5)$$

поскольку $AC \parallel BK$ и BC — секущая, по свойству параллельных прямых $\alpha_1 = \alpha_2$.

Объем межтрубного пространства, занятого трубами (V_T), рассчитывают путем следующих тригонометрических преобразований, выполняемых программой [5].

По свойству прямоугольника, так как диагонали $AC \cap BD = O$ пересекаются в точке O и точкой пересечения делятся пополам, имеем $AO = OC$.

Проведем линию $MN \parallel AB$ через точку O и рассмотрим образованные прямоугольные треугольники $\triangle ONC$ и $\triangle AOM$. По признаку равенства прямоугольных треугольников (по гипотенузе $AO = OC$ и острому углу $\alpha_2 = \alpha_3$) $\triangle ONC = \triangle AOM$, и расчет объема, занятого трубами,

правомерно проводить в границах прямоугольника АВNM по формуле

$$V_T = \pi h_{\text{труб}} \left(\frac{d_{\text{труб}}}{2} \right)^2, \quad (6)$$

где $h_{\text{труб}} = BN$ — длина части трубы, погруженной в компаунд.

Необходимо отметить, что при выполнении технологического подъема на угол $\alpha \geq 45^\circ$, представленный расчет будет справедлив для ТА всех типоразмеров. Такой наклон ТА легко осуществим для большинства небольших теплообменных аппаратов (длиной до 1,5 м).

Для проведения расчета при подъеме на меньший угол ($10^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$) необходимым условием является выполнение следующего соотношения сторон ТА:

$$\frac{AB}{BC} \geq \frac{1}{5,5}. \quad (7)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. **Спирягин В. В., Медеяев И. А., Чмыхало А. И.** Модель потери работоспособности металлоконструкций испарителя холодильной машины // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 11. С. 483—492.
2. УО 38.011.85-83 Общие технические условия на ремонт кожухотрубчатых теплообменников. Миннефтехимпром СССР, 1983. ВНИКТИнефтехимоборудование.
3. **Панкин Д. А., Спирягин В. В., Челноков А. В., Чмыхало А. И.** Способ защиты от коррозии и восстановления поверхностей теплообменника. Патент 2695204 РФ, МПК B05C 7/08, F28F 19/00, F28F 21/00. Заявитель и патентообладатель — ВА РВСН. № 2018117167. Заявл. 08.05.2018. Оpubл. 22.07.2019. Бюл. № 21. — 7 с.
4. **Чмыхало А. И., Челноков А. В., Журкина Е. Ю., Панкин Д. А.** Способ ремонта трубных решеток теплообменного аппарата. Заявка 2020143150 РФ, МПК B05D 7/22 от 25.12.2020.
5. **Спирягин В. В., Герасимов А. В., Чмыхало А. И.** Программа расчета объема компаунда, требуемого для ремонта трубной решетки в зависимости от угла подъема. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU № 2021610967. Заявл. 25.12.2020. Оpubл. 20.01.2021.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR REPAIRING TUBE SHEETS OF HEAT EXCHANGERS

V. V. Spiryagin, A. P. Shovkalyuk

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

A. I. Chmykhalo, A. V. Chelnokov

Military Academy of the Strategic Missile Forces after Peter the Great, Balashikha, Moscow region, Russia

The article is devoted to the development of a method for repairing tube sheets of heat exchangers by applying a protective coating to the areas of mating of tube sheets and heat exchange tubes. Information on the developed software is provided, which allows to quickly calculate the required composition for repair. It was found that the use of the developed method and software makes it possible to apply a protective coating mainly on the inner side of the tube sheets of the heat exchanger under conditions of a minimum consumption of the thermosetting compound.

Keywords: heat exchangers, tube sheets, repair, protective coating, compound, Matlab.

Bibliography — 5 references.

Received February 26, 2021

УДК 658.512.8

DOI: 10.52190/1729-6552_2021_2_8

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД В СИСТЕМЕ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВВТ ПВО СВ

П. А. Кобелев; М. Е. Дьячков

Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Научно-образовательный центр ВКО «Алмаз-Антей», Москва, Россия

Р. В. Шевченко, канд. техн. наук

АО «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Россия

Рассмотрены характерные особенности системы сервисного обслуживания вооружения и военной техники ПВО с организационной точки зрения. Описаны структура производственной системы, особенности функционального подхода к управлению, структура системы сервисного обслуживания с применением процессного подхода, что позволяет рассматривать предприятие как совокупность процессов в соответствии с новыми стандартами системы менеджмента качества.

Ключевые слова: сервисное обслуживание, функциональный подход, процессный подход, вооружение и военная техника, противовоздушная оборона сухопутных войск (ПВО СВ), производственный процесс, основной процесс, вспомогательный процесс.

При создании сложных, наукоемких комплексов ПВО, необходимых для обеспечения обороноспособности государства, остро стоит вопрос поддержания вооружения и военной техники (ВВТ) в рабочем состоянии, т. е. в таком состоянии, в котором объект способен выполнять какую-либо требуемую функцию [1]. Указанным целям призвана служить система сервисного обслуживания, рассматриваемая как совокупность взаимосвязанных средств, необходимых для поддержания и восстановления объектов, входящих в эту систему. К таким средствам относятся технические средства, документация, необходимая для проведения технического обслуживания, а также трудовые и экономические ресурсы.

Как правило, сервисное обслуживание образцов ВВТ проводится непосредственно на местах дислокации эксплуатирующей организации, т. е. ремонт осуществляется в полевых условиях,

в месте, не предназначенном специально для ремонта и не оборудованном стационарными средствами, с применением специальных бригад, а также специальных комплексов запасных частей и переносных средств [1]. Наряду с этим может применяться техническое обслуживание в стационарных условиях, т. е. в специально предназначенных местах, оборудованных стационарными средствами технического обслуживания с применением в случае необходимости переносных средств [1].

Под сервисным обслуживанием понимают комплекс мероприятий, проводимых силами предприятий и организаций промышленности в войсковых частях, по поддержанию ВВТ в исправном состоянии, обеспечению их боеготовности и безопасности эксплуатации. Однако если обратиться к государственному военному стандарту ГОСТ РВ 0101-001-2007, то там сервисное обслуживание изделия военной техники трактуется как комплекс работ, направленных на поддержание и восстановление работоспособного или исправного состояния и ресурса изделия военной техники, выполняемых специалистами сервисной организации самостоятельно или с участием личного состава эксплуатирующей организации и других исполнителей. Стоит отметить, что сервисное обслуживание — это техническое обслуживание и различные виды ремонта изделия военной техники, работы по гарантийным обязательствам сервисной организации,

Кобелев Пётр Андреевич, аспирант.

E-mail: kblv.pa@gmail.com

Дьячков Максим Евгеньевич, аспирант.

E-mail: ya_max@inbox.ru

Шевченко Роман Викторович, заместитель главного инженера.

E-mail: srv3000@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 января 2021 г.

© Кобелев П. А., Дьячков М. Е., Шевченко Р. В., 2021

работу по бюллетеням, мониторинг технического состояния изделия военной техники, хранение запасных частей и материалов, обучение специалистов эксплуатирующей организации, а также, при необходимости, другие виды работ и услуг, предусмотренные контрактом [2].

Для проведения работ по постгарантийному сервисному обслуживанию изделий ВВТ ПВО создаются сервисные центры, которые работают на основании заключаемых контрактов с Министерством обороны РФ.

Авторами данной работы ставится задача анализа предприятия, рассмотрения производственной системы с применением процессного подхода, что представляет собой современную тенденцию и является одним из ключевых принципов стандартов серии ИСО 9001.

Функциональный подход к управлению предприятием

Если сервисный центр рассматривать как некое обобщенное предприятие, представляющее собой систему деятельности человека, то стоит привести структуру предприятия, которая характерна как для сервисных центров, так и для многих других организаций. Рассмотрим производственную структуру, изображенную на рис. 1. Видно, что предприятие можно представить в виде совокупности двух укрупненных структур: непосредственно производство (некая часть предприятия, занятая в преобразовании каких-либо ресурсов в другие) и управляющая структура (регулирует процесс производства и управляет взаимодействием производственной системы с внешней средой, которое на данной схеме показано посредством блоков входа и выхода).

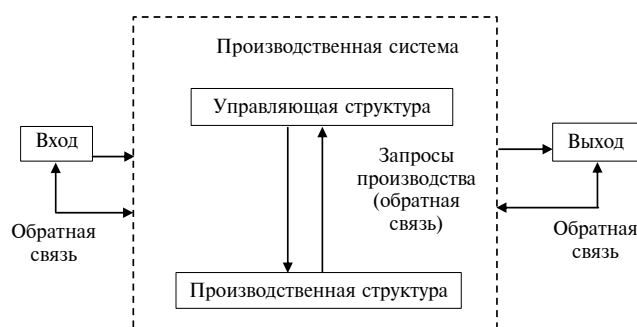


Рис. 1. Упрощенная схема производственной структуры

Из рисунка видно, что глобально предприятие вовлечено в три процесса, это получение ресурсов и регламентирующих документов из

внешней среды посредством входа, преобразование полученных ресурсов в готовый продукт силами производственной системы и последующая передача во внешнюю среду посредством выхода [3]. Также важными элементами на данной схеме являются обратные связи, благодаря которым производится урегулирование разногласий с заказчиками, смежными предприятиями, поставщиками каких-либо ресурсов и т. д.

Охарактеризуем производственную систему более подробно. На предприятиях ВПК, как правило, применяют линейно-функциональную систему управления, где в качестве функциональных руководителей выступают заместители генерального директора по определенным направлениям, к примеру главный инженер, заместитель по экономике, заместитель по общехозяйственной деятельности и т. д. В свою очередь каждому из функциональных руководителей подчиняются определенные структурные подразделения. Для линейно-функциональной структуры характерно разделение управленческого труда, как уже говорилось ранее. При этом линейные звенья обладают достаточно большой самостоятельностью и широкой зоной ответственности, а функциональные призваны помогать, консультировать при разработке конкретных вопросов, планов, программ или каких-либо конкретных решений. Данная модель управления имеет как ряд достоинств, так и ряд недостатков.

Достоинства линейно-функциональной модели управления:

- Более глубокая проработка задач, связанных со специализацией работников.
- Освобождение линейных руководителей от ряда вопросов (планирование финансовых расчетов, материально-техническое обеспечение и т. д.).
- Иерархическое подчинение работников начальнику (каждый работник подчиняется только одному руководителю).

Недостатки линейно-функциональной модели управления:

- Каждое структурное подразделение заинтересовано только в достижении своей конкретной цели, только в выполнении поставленной перед ним задачи. При этом отсутствует интерес к достижению какой-либо общей цели предприятия. В результате заинтересовано только финальное звено производственной цепочки.
- Отсутствие тесных взаимосвязей и взаимодействия между структурными подразделениями на горизонтальном уровне, так как каждое структурное подразделение настроено работать не на достижение общей цели, а на то, чтобы удовлетворить запросы руководителя.

- Аккумуляция на верхнем уровне не только стратегических, но и оперативных задач.

Два последних недостатка являются в некотором роде продолжением второго. Каждое структурное подразделение нацелено на выполнение какой-то локальной задачи, которую ставит перед ним непосредственный руководитель, при этом не заботясь о достижении общего результата предприятия. В конечном итоге все сводится к тому, что каждое подразделение работает в своих интересах и происходят перекосы в глобальном производственном процессе. Наряду с этим возникает еще один недостаток — неспособность к оперативному управлению структурных подразделений. Все действия по оперативному урегулированию оперативных задач структурными подразделениями приводят к тому, что они передаются на решение руководителю, что, как правило, приводит к дополнительному снижению скорости выполнения процесса, так как требует от руководителя постоянного внимания.

Процессный подход к управлению предприятием

В качестве альтернативы предлагается внедрение процессного подхода в управлении. Государственный военный стандарт ГОСТ РВ 0015-002-2012 направлен на применение процессного подхода на предприятиях ВПК. Также данным стандартом ставится задача продвижения процессного подхода при менеджменте качества во всей организации [4].

Под подходом к управлению принято понимать способ делегирования полномочий и ответ-

ственности исполнителю. Таким образом, процессный подход к управлению — это способ делегирования полномочий и ответственности через бизнес-процессы. В свою очередь, бизнес-процесс представляет собой устойчивую многократно повторяющуюся деятельность, в результате которой происходит преобразование материальных и/или информационных средств, поступивших на вход процесса, в продукт, поступающий на выход [5]. Рассмотрим структуру типового процесса, приведенную на рис. 2.

На рис. 2 показан бизнес-процесс, который представляет собой типовую повторяющуюся деятельность предприятия, осуществляемую участниками бизнес-процесса. На данной структуре показан только хозяин процесса, который, в свою очередь, является участником. Остальные участники не отражены в целях упрощения структурной схемы. Бизнес-процесс не может существовать без каких-либо ресурсов, которые могут быть представлены оборудованием, технологиями, инфраструктурой и т. д. Ресурсы показаны на границе бизнес-процесса, так как они могут не только быть локализованы в руках участников процесса, но и участвовать в каких-либо иных бизнес-процессах или располагаться в какой-либо иной, внешней по отношению к данному процессу среде. Процесс обладает входом и выходом, куда поступают материальные или информационные средства и откуда продукт деятельности процесса поступает потребителю. Потребителем при этом может быть как следующее производственное звено внутри предприятия, так и внешний потребитель. На приведенной структурной схеме также отображен блок "Вышестоящее управление". Данное место может занимать функциональный руководитель, который ответственен за результат бизнес-процесса.

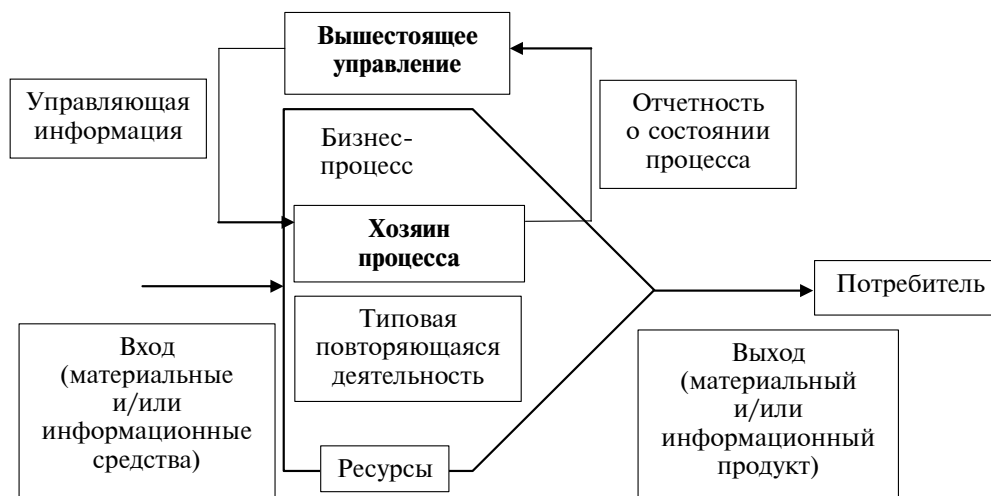


Рис. 2. Структура типового процесса

В рамках процессного подхода деятельность организации представляется как набор бизнес-процессов. Затем производится анализ выстроенной совокупности и выделяется проблемная её часть. Как правило, работают только с проблемным бизнес-процессом, так как процессное описание всей деятельности организации представляет собой крайне трудоёмкую процедуру и при этом не дает эффекта, пропорционального затраченным на данное мероприятие ресурсам. Выделяя проблемный бизнес-процесс, выделяют также его участников, одного из которых назначают держателем процесса. Ему делегируются полномочия и ответственность по управлению данным бизнес-процессом. Таким образом выстраивается матричная структура при управлении регулярной деятельностью предприятия. При такой организации подхода к управлению каждый участник процесса подчиняется непосредственно держателю бизнес-процесса и функциональному руководителю, что свидетельствует о применении одновременно двух подходов к управлению: процессного и функционального. Стоит отметить, что при этом может применяться еще и проектный подход к управлению. Соответственно в деятельности предприятия может применяться сочетание всех трех подходов к управлению, один из которых будет находиться в суперпозиции.

Теперь постараемся понять, в чем состоит выгода от использования процессного подхода и почему его применение в некоторых случаях необходимо.

При рассмотрении системного подхода как направления методологии науки, в основе которого лежит принцип рассмотрения какого-либо объекта как системы, т. е. целостного комплекса взаимосвязанных элементов, следует обратить внимание на принцип системности, согласно которому свойства объекта как целостной системы определяются суммой свойств отдельных его компонентов, свойствами структуры объекта, особыми системообразующими, интегративными связями. Функциональный подход к управлению предполагает достижение максимально возможных показателей эффективности для каждого из структурных звеньев (компонентов системы), что не приводит к достижению максимальной результативности предприятия. Процессный подход предполагает настройку основного процесса таким образом, чтобы достичь максимальной эффективности основного процесса, путем настройки "оптимальности" подпроцессов.

Реализация процессного подхода требует в обязательном порядке наличия следующих обязательных компонент:

- выделение бизнес-процесса, определение его границ, внешнего окружения, подсистем и компонентов, потребляемых ресурсов, планируемых результатов деятельности;
- ключевые показатели эффективности, включая систему их планирования и контроля, т. е. систему измеримых показателей, отражающих результативность и эффективность бизнес-процесса;
- определение владельца процесса, который сам является участником бизнес-процесса и которому делегированы полномочия и ответственность по управлению;
- документирование бизнес-процесса, всестороннее описание объекта управления в объеме, необходимом для всех заинтересованных лиц, в первую очередь для участников бизнес-процесса, а также владельца и контролеров;
- система мотивации участников на достижение запланированного результата [6].

Таким образом, внедрение процессного подхода к управлению позволяет внедрить матричную систему управления, ввести институт кросс-функциональных владельцев бизнес-процесса, что конфликтует с общепринятым авторитарным стилем управления. При этом даже частичная реализация процессного подхода, в частности описание границ процесса и его функционирования, ведет к улучшению качества бизнес-процесса, так как приводит к обмену информацией между участниками и к лучшему пониманию ими общих задач, стоящих перед организацией [7].

Ознакомившись с таким понятием, как процессный подход, и его основными принципами, рассмотрим деятельность предприятия по сервисному обслуживанию, представляя ее в качестве подпроцессов. Как уже упоминалось, сервисное обслуживание — широкий перечень работ. Рассмотрим обслуживание образцов ВВТ в войсковых условиях с применением комплексных выездных бригад специалистов, при котором проводятся техническое диагностирование, восстановление, техническое обслуживание, модернизация образцов ВВТ, а также регулировочные и наладочные работы, передача изделий в эксплуатацию и т. д.

На рис. 3 представлена блок-схема, иллюстрирующая этапы выполнения работ по сервисному обслуживанию.

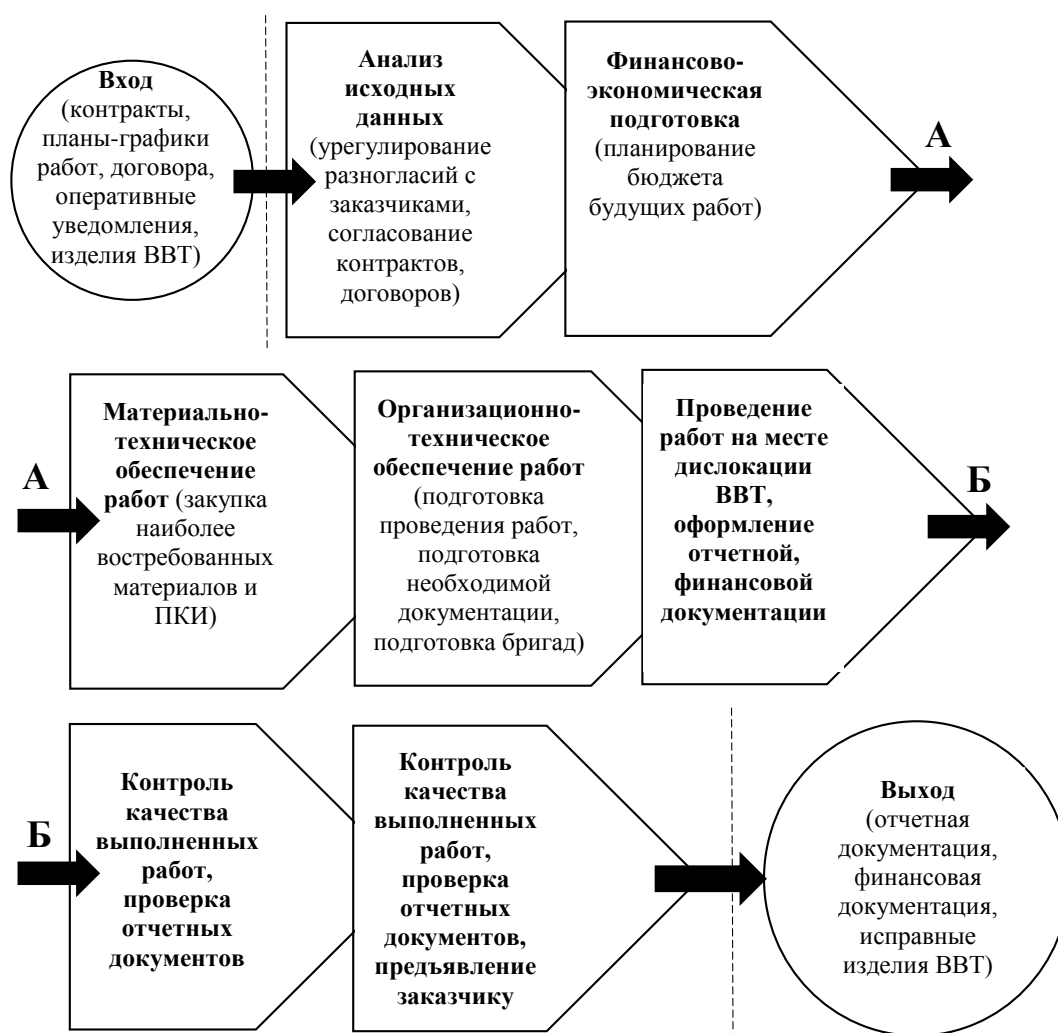


Рис. 3. Блок-схема выполнения работ по сервисному обслуживанию ВВТ

Приведенное на рис. 3 структурное представление процесса сервисного обслуживания является первым и одним из основных шагов, позволяющих описать процесс и провести анализ проблемных участков, для которых требуется более подробная проработка. Возвратясь к системному подходу, в частности к принципу иерархичности, о каждом подпроцессе можно судить как о системе, обладающей относительной автономностью поведения, т. е. каждый из элементов описанного процесса может быть декомпозирован до более низкого уровня, что, в свою очередь, позволяет достаточно глубоко изучить и задокументировать процесс. Это положительно скажется на понимании процесса персоналом, а также позволит управлять процессом посредством планирования и мониторинга с измерениями (что предписывается стандартами

ИСО 9001), так как процессный подход сам по себе предполагает наличие и оценку ключевых показателей эффективности процесса.

Заключение

Рассмотрев линейно-функциональный и процессный подходы применительно к сервисному обслуживанию ВВТ, можно утверждать, что процессный подход является мощным и эффективным инструментом настройки оптимальности производственных процессов. Даже частичное использование функций, предлагаемых процессным подходом, способно принести пользу при отладке процессов предприятия. Важно, что применение процессного подхода в управлении не предполагает отказа от принятой на предпри-

ятии системы управления, лишь в дополнение к сложившейся системе происходят документирование и организация взаимосвязей подразделений по горизонтали. Это освобождает от необ-

ходимости постоянного обращения к функциональному руководителю, что, в свою очередь, позитивно сказывается на скорости решения возникающих вопросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июня 2016 г. № 654-ст). — М.: Стандартинформ, 2016.
2. ГОСТ РВ 0101-001-2007 Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2011.
3. **Дьячков М. Е., Кобелев П. А., Шевченко Р. В.** Сервисное обслуживание вооружения и военной техники как производственная система в сфере услуг: сб. ст. по мат. XXI Междунар. науч.-практ. конф. "Технические науки: проблемы и решения". — М.: Интернаука, 2019. № 3(19). С. 53—59.
4. Государственный военный стандарт ГОСТ РВ 0015-002-2012 Система разработки и постановки на производство военной техники. — М.: Стандартинформ, 2012.
5. **Сычева Е. Н., Пермькова Е. С.** Процессный подход в управлении предприятием // Экономика и бизнес: теория и практика. 2016. № 1. С. 124—127.
6. **Мальцев С. В.** Процессный подход к управлению: теория и практика [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cfin.ru/ itm/bpr/t&p.shtml](https://www.cfin.ru/itm/bpr/t&p.shtml) (дата обращения: 13.01.2021).
7. **Гришко Л. А., Серая Н. Н.** Процессный подход в современной практике управления // Инновационная экономика перспективы развития и совершенствования. 2018. № 7(33). Т. 1. С. 155—159.

BUSINESS PROCESS MANAGEMENT (BPM) IN THE SYSTEM OF ARMY AIR DEFENSE AND MILITARY EQUIPMENT MAINTENANCE

P. A. Kobelev, M. E. Dyachkov

Independent Non-Profit Organization of Further Vocational Education

"Science and Education Center of Aerospace Defense "ALMAZ-ANTEY", Moscow, Russia

R. V. Shevchenko

Joint-Stock Company "Ryazan Production and Technological Enterprise "Granit",
Ryazan, Russia

The characteristic features of the service system of weapons and military air defense equipment from an organizational point of view. The structure of the production system is considered, the features of the functional approach to management, the structure of the service system using the business process management are considered. This allows us to consider the enterprise as a set of processes in accordance with the new standards of the quality management system.

Keywords: service maintenance, functional approach, process approach, weapons and military equipment, air defense of ground forces (air defense), production process, main process, auxiliary process.

Bibliography — 7 references.

Received January 17, 2021

РЕЗОНАНСЫ И АНТИРЕЗОНАНСЫ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

И. П. Попов

Курганский государственный университет, г. Курган, Россия

Определены резонанс и антирезонанс сил, резонанс и антирезонанс скоростей в механических системах.

Ключевые слова: реактанс, резистанс, импеданс, сассептанс, кондактанс, адмитанс.

В установившемся режиме при гармонических воздействиях удобно использовать комплексное представление величин [1]. При этом символический (комплексный) метод существенно упрощает исследование резонансных и околорезонансных явлений [2, 3]. В отличие от классического метода здесь не возникает необходимости в составлении и решении дифференциальных уравнений [4–7].

По аналогии с электротехникой гармоническую величину можно представить в виде

$$a = A \sin(\omega t + \varphi) = \text{Im} [Ae^{i(\omega t + \varphi)}],$$

где $Ae^{i(\omega t + \varphi)}$ — вращающийся в комплексной плоскости вектор;

ω — циклическая частота;

φ — начальная фаза.

Векторы в комплексной плоскости принято изображать для нулевого момента времени. При этом величина $Ae^{i(\omega \cdot 0 + \varphi)} = Ae^{i\varphi} = \dot{A}$ называется *комплексной амплитудой*.

В основе исследования механических систем лежит дуально-инверсный аналог закона Ома для участка электрической цепи:

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \dot{F} \underline{y}, \quad (1)$$

где \dot{V} и \dot{F} — комплексные амплитуды скорости и силы;

\underline{z} и \underline{y} — механические импеданс (*impedance*) и адмитанс (*admittance*) в комплексном представлении [8].

Попов Игорь Павлович, старший преподаватель кафедры "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты".
E-mail: ip.porow@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17 января 2021 г.

© Попов И. П., 2021

Над комплексными величинами, не являющимися изображениями синусоиды, точка не ставится, такие величины подчеркиваются.

Далее рассмотрены параллельное (рис. 1) и последовательное (рис. 2) соединения элементов механической системы.

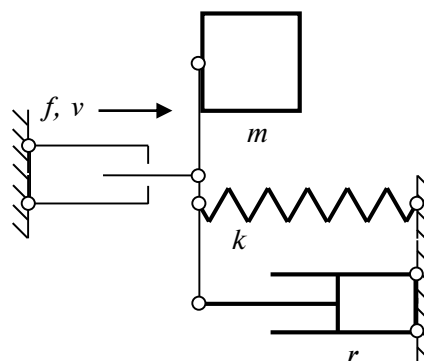


Рис. 1. Параллельное соединение

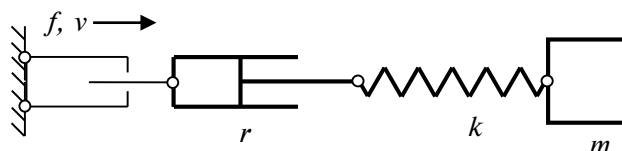


Рис. 2. Последовательное соединение

Аналитические описания резонанса в курсах теоретической механики соответствуют параллельному соединению.

Источниками внешнего механического гармонического воздействия на систему выступают либо источник силы, либо источник скорости [9].

Существуют устройства, в удовлетворительном приближении способные выполнять функции источников силы и источников скорости. В качестве источника гармонической скорости может выступать привод с кривошипно-

кулисным механизмом и маховиком с большим моментом инерции, источником гармонической силы может выступать шток пневмоцилиндра, полость которого сообщается с полостью другого пневмоцилиндра, диаметр которого неизменно превышает диаметр первого, а поршень совершает гармонические колебания.

Источник силы характеризуется комплексной амплитудой силы

$$\dot{F} = Fe^{i0}. \quad (2)$$

Источник скорости характеризуется комплексной амплитудой скорости

$$\dot{V} = Ve^{i0}. \quad (3)$$

Механические гармонические воздействия, описываемые в курсах теоретической механики, соответствуют источнику силы.

Параллельное соединение характеризуется следующими величинами [8]:

- инертный реактанс (*reactance*)

$$\underline{x}_m = \omega m e^{i\pi/2} = x_m e^{i\pi/2}, \quad (4)$$

где m — масса;

- упругий реактанс

$$\underline{x}_k = \frac{k}{\omega} e^{-i\pi/2} = x_k e^{-i\pi/2}, \quad (5)$$

где k — коэффициент упругости;

- механический резистанс (*resistance*)

$$\underline{r} = r e^{i0} = r,$$

где r — коэффициент вязкого сопротивления;

- механический импеданс

$$\underline{z} = Z e^{i\varphi},$$

$$\text{где } Z = \sqrt{r^2 + (x_m - x_k)^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{x_m - x_k}{r}. \quad (6)$$

Последовательное соединение характеризуется следующими величинами [8]:

- инертный сасцептанс (*susceptance*)

$$\underline{b}_m = \frac{1}{\omega m} e^{-i\pi/2} = b_m e^{-i\pi/2}; \quad (7)$$

- упругий сасцептанс

$$\underline{b}_k = \frac{\omega}{k} e^{i\pi/2} = b_k e^{i\pi/2}; \quad (8)$$

- механический кондактанс (*conductance*)

$$\underline{g} = g e^{i0} = g;$$

- механический адмитанс

$$\underline{y} = Y e^{i\varphi},$$

$$\text{где } Y = \sqrt{g^2 + (b_k - b_m)^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{b_k - b_m}{g}. \quad (9)$$

Для элемента (инертного, упругого, резистивного), рассматриваемого вне связи с другими механическими элементами, $\underline{b}_m = 1/\underline{x}_m$, $\underline{b}_k = 1/\underline{x}_k$, $\underline{g} = 1/\underline{r}$. В системе, включающей несколько элементов, соотношения иные [7].

Параллельное соединение и источник силы. Резонанс сил

Комплексная амплитуда скорости (см. (1))

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{F}{z} e^{-i\varphi} = V e^{-i\varphi}. \quad (10)$$

Комплексная амплитуда инертной силы

$$\dot{F}_m = \underline{x}_m \dot{V} = x_m V e^{i(\pi/2-\varphi)} = F_m e^{i(\pi/2-\varphi)}. \quad (11)$$

Комплексная амплитуда упругой силы

$$\dot{F}_k = \underline{x}_k \dot{V} = x_k V e^{-i(\pi/2+\varphi)} = F_k e^{-i(\pi/2+\varphi)}. \quad (12)$$

Комплексная амплитуда резистивной силы

$$\dot{F}_r = \underline{r} \dot{V} = r V e^{-i\varphi} = F_r e^{-i\varphi}. \quad (13)$$

Очевидно, что

$$\dot{F}_m + \dot{F}_k + \dot{F}_r = \dot{F}. \quad (14)$$

Из закона Гука, (12) и (5) следует выражение для комплексной амплитуды отклонения:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \frac{\dot{F}_k}{k} = \frac{x_k V e^{-i(\pi/2+\varphi)}}{k} = \frac{k V e^{-i(\pi/2+\varphi)}}{\omega k} = \\ &= \frac{V}{\omega} e^{-i(\pi/2+\varphi)} = X e^{-i(\pi/2+\varphi)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Из второго закона Ньютона, (11) и (4) следует выражение для комплексной амплитуды ускорения:

$$\begin{aligned} \ddot{A} &= \frac{\dot{F}_m}{m} = \frac{x_m V e^{i(\pi/2-\varphi)}}{m} = \frac{\omega m V e^{i(\pi/2-\varphi)}}{m} = \\ &= \omega V e^{i(\pi/2-\varphi)} = A e^{i(\pi/2-\varphi)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Очевидно, что

$$A = \omega V = \omega^2 X.$$

Из (10)–(16) и (4)–(6) следуют амплитудно-частотные характеристики:

$$\begin{aligned} F_k(\omega) &= \frac{kF}{\omega \sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}; \\ X(\omega) &= \frac{F}{\omega \sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}; \\ F_r(\omega) &= \frac{rF}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}; \\ V(\omega) &= \frac{F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} F_m(\omega) &= \frac{\omega m F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}; \\ A(\omega) &= \frac{\omega F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Очевидно, что

$$F = \sqrt{F_r^2 + (F_k - F_m)^2}. \quad (19)$$

Графики функций $X(\omega)$, $V(\omega)$, $A(\omega)$ ведут себя качественно так же, как, соответственно, $F_k(\omega)$, $F_r(\omega)$, $F_m(\omega)$.

Частота ω_k , на которой функции $X(\omega)$ и $F_k(\omega)$ имеют максимум, определяется из условия

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega^{-1} \left[\left(k\omega^{-1} - m\omega \right)^2 + r^2 \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\begin{aligned} \omega_k &= \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{1 - r^2/(2km)} = \\ &= \omega_0 \sqrt{1 - r^2/(2x_w^2)} = \omega_0 \sqrt{1 - d^2/2}, \end{aligned}$$

где $x_w = \sqrt{km}$ — волновое сопротивление (системы);
 $d = r/x_w$ — затухание (системы) (по аналогии с электротехникой).

Тогда

$$\begin{aligned} F_{k \max} &= F_k(\omega_k) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} F; \\ X_{\max} &= X(\omega_k) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} \frac{F}{k} = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} X_0, \end{aligned}$$

где $Q = 1/d$ — добротность (системы) (по аналогии с электротехникой);

$X_0 = X(0) = F/k$ — статическое отклонение.

Частота ω_r , на которой функции $V(\omega)$ и $F_r(\omega)$ имеют максимум, очевидным образом равна $\omega_r = \sqrt{k/m} = \omega_0$.

Тогда

$$F_{r \max} = F_r(\omega_0) = F; \quad V_{\max} = V(\omega_0) = \frac{F}{r}. \quad (20)$$

Частота ω_m , на которой функции $A(\omega)$ и $F_m(\omega)$ имеют максимум, определяется из условия

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega \left[\left(k\omega^{-1} - m\omega \right)^2 + r^2 \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\omega_m = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{1}{\sqrt{1 - r^2/(2km)}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - d^2/2}}. \quad (21)$$

Тогда

$$\begin{aligned} F_{m \max} &= F_m(\omega_m) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} F; \\ A_{\max} &= A(\omega_m) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} \frac{F}{m} = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} A_0, \end{aligned} \quad (22)$$

где $A_0 = A(0) = F/m$ — постоянное ускорение (при нулевой частоте).

При $d^2/2 > 1$ функции $X(\omega)$, $A(\omega)$, $F_k(\omega)$, $F_m(\omega)$ не имеют максимумов в вещественном диапазоне частот.

Примечательно, что

$$\omega_k \omega_m = \omega_0^2; \quad (23)$$

$$F_{k \max} = F_{m \max}; \quad (24)$$

$$A_{\max} = \omega_0^2 X_{\max}; \quad (25)$$

$$\frac{A_{\max}}{\omega_m} = \omega_k X_{\max} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{1-d^2/4}}. \quad (26)$$

Другие характерные точки:

$$F_m(\omega_k) = \frac{Q-d/2}{\sqrt{1-d^2/4}} F; \quad A(\omega_k) = \frac{Q-d/2}{\sqrt{1-d^2/4}} A_0; \quad (27)$$

$$F_k(\omega_m) = \frac{Q-d/2}{\sqrt{1-d^2/4}} F; \quad X(\omega_m) = \frac{Q-d/2}{\sqrt{1-d^2/4}} X_0; \quad (28)$$

$$\begin{aligned} F_m(\omega_0) &= QF; \quad A(\omega_0) = QA_0; \\ F_k(\omega_0) &= QF; \quad X(\omega_0) = QX_0; \end{aligned} \quad (29)$$

$$F_r(\omega_k) = F_r(\omega_m) = \frac{\sqrt{1-d^2/2}}{\sqrt{1-d^2/4}} F;$$

$$V(\omega_k) = V(\omega_m) = \frac{\sqrt{1-d^2/2}}{\sqrt{1-d^2/4}} \frac{F}{r} = \frac{\sqrt{1-d^2/2}}{\sqrt{1-d^2/4}} V(\omega_0). \quad (30)$$

Характерные отношения:

$$\begin{aligned} \frac{F_k(\omega_k)}{F_m(\omega_k)} &= \frac{F_m(\omega_m)}{F_k(\omega_m)} = \frac{F_k(\omega_k)}{F_k(\omega_m)} = \frac{F_m(\omega_m)}{F_m(\omega_k)} = \\ &= \frac{X(\omega_k)}{X(\omega_m)} = \frac{A(\omega_m)}{A(\omega_k)} = \frac{1}{1-d^2/2}; \end{aligned} \quad (31)$$

$$\frac{F_k(\omega_k)}{F_r(\omega_k)} = \frac{F_m(\omega_m)}{F_r(\omega_m)} = \frac{Q}{\sqrt{1-d^2/2}}; \quad (32)$$

$$\frac{F_k(\omega_m)}{F_r(\omega_m)} = \frac{F_m(\omega_k)}{F_r(\omega_k)} = Q\sqrt{1-d^2/2}. \quad (33)$$

На рис. 3 представлены *подлинные* резонансные кривые для системы с параметрами $F = 100$ Н, $m = 10$ кг, $k = 40$ кг·с⁻², $r = 10$ кг·с⁻¹.

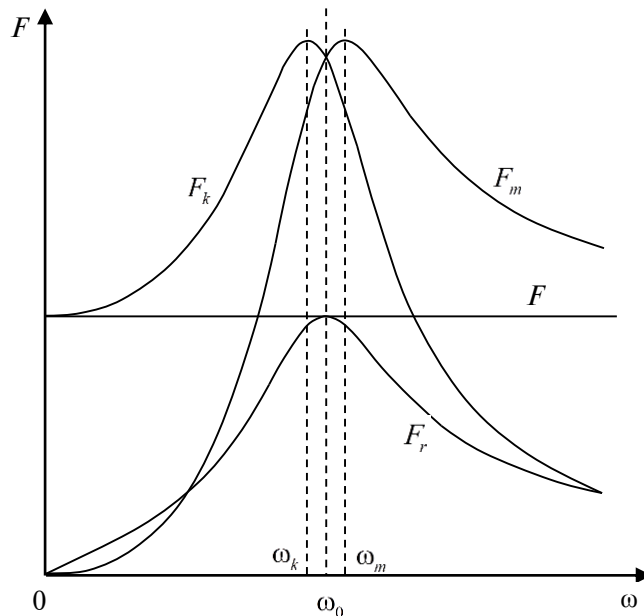


Рис. 3. Резонанс сил

На том основании, что амплитуда отклонения X имеет максимум на частоте ω_k ($\omega_k < \omega_0$), ω_k считается резонансной частотой [10].

Это было бы сильным решением, если бы X был единственным значимым кинематическим параметром. Однако не менее значимыми параметрами являются амплитуды скорости V и ускорения A . При этом первая имеет максимум на частоте ω_0 , а вторая — на частоте ω_m ($\omega_m > \omega_0$). Таким образом, ω_k ничем не лучше ω_0 и ω_m . Единственным аргументом при выборе резонансной частоты остается соображение симметрии (усиленное выражением (23)), в соответствии с которым резонансной частотой является ω_0 .

Данный выбор становится еще более очевидным, если обратиться к силам.

Амплитуда упругой силы F_k имеет максимум на частоте ω_k , амплитуда инертной силы F_m — на частоте ω_m . Отдать предпочтение той или другой частоте невозможно. Однако именно на частоте ω_0 имеет место *резонанс сил*, при котором реактивные силы F_k и F_m равны и противоположны, а их сумма, соответственно, равна нулю [11].

С другой стороны, величина импеданса механической системы $Z = \sqrt{r^2 + (x_m - x_k)^2}$, характеризующего ее свойство оказывать сопротивление приводу, понуждающему ее совершать колебания, имеет минимальное значение на ча-

стоте ω_0 . Другими словами, именно на частоте ω_0 система оказывает приводу минимальное сопротивление.

Таким образом, резонансной частотой является исключительно ω_0 .

Параллельное соединение и источник скорости. Антирезонанс сил

Комплексная амплитуда инертной силы

$$\dot{F}_m = \dot{x}_m \dot{V} = x_m V e^{i\pi/2} = F_m e^{i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда упругой силы

$$\dot{F}_k = \dot{x}_k \dot{V} = x_k V e^{-i\pi/2} = F_k e^{-i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда резистивной силы

$$\dot{F}_r = \dot{r} \dot{V} = r V e^{i \cdot 0} = F_r e^{i \cdot 0}.$$

Очевидно, что

$$\dot{F}_m + \dot{F}_k + \dot{F}_r = \dot{F}.$$

Комплексная амплитуда отклонения

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \frac{\dot{F}_k}{k} = \frac{x_k V e^{-i\pi/2}}{k} = \frac{k V e^{-i\pi/2}}{\omega k} = \\ &= \frac{V}{\omega} e^{-i\pi/2} = X e^{-i\pi/2}. \end{aligned} \quad (34)$$

Комплексная амплитуда ускорения

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \frac{\dot{F}_m}{m} = \frac{x_m V e^{i\pi/2}}{m} = \frac{\omega m V e^{i\pi/2}}{m} = \\ &= \omega V e^{i\pi/2} = A e^{i\pi/2}. \end{aligned} \quad (35)$$

Комплексная амплитуда силы (см. (1))

$$\dot{F} = \dot{V} \underline{z} = V \underline{z} e^{i\varphi} = F e^{i\varphi}.$$

Амплитудно-частотная характеристика

$$F(\omega) = V \sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}.$$

При $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$ кривая $F(\omega)$ устремляется в бесконечность. При сверхмалых частотах условие (3) порождает чрезмерные деформации упругого элемента (34), сопровождаемые, соот-

ветственно, чрезмерными силами упругости. При сверхвысоких частотах условие (3) порождает чрезмерные ускорения (35) и чрезмерные инерционные силы.

При ω_0 график проходит через минимум $F_{\min} = F(\omega_0) = Vr = F_r$. Имеет место *антирезонанс сил*, при котором реактивные силы F_k и F_m равны и противоположны, а их сумма, соответственно, равна нулю.

Для антирезонанса разночтений со смещением антирезонансной частоты (она же резонансная) не возникает.

На рис. 4 представлена *подлинная* антирезонансная кривая для системы, отличающейся от первой тем, что $V = 10$ м/с.

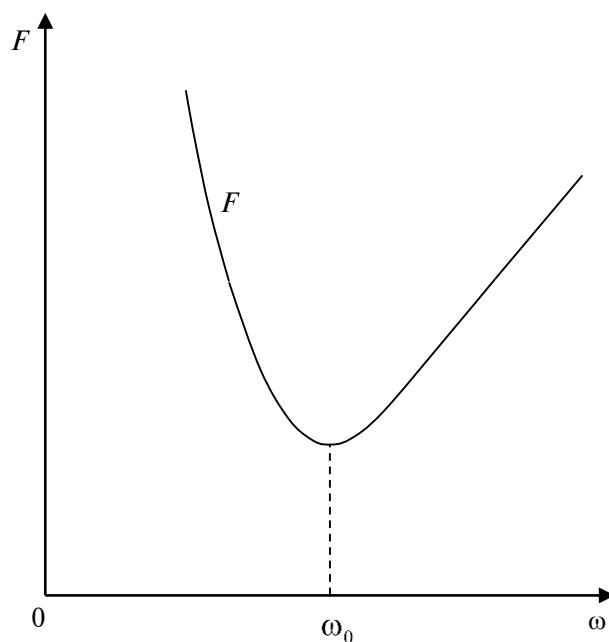


Рис. 4. Антирезонанс сил

Последовательное соединение и источник скорости. Резонанс скоростей

Порядок рассуждений такой же, как и ранее. Комплексная амплитуда силы (см. (1))

$$\dot{F} = \frac{\dot{V}}{\underline{y}} = \frac{V}{y} e^{-i\varphi} = F e^{-i\varphi}. \quad (36)$$

Комплексная амплитуда скорости инертного элемента

$$\dot{V}_m = \underline{b}_m \dot{F} = b_m F e^{-i(\pi/2+\varphi)} = V_m e^{-i(\pi/2+\varphi)}. \quad (37)$$

Комплексная амплитуда скорости изменения длины упругого элемента

$$\dot{V}_k = \underline{b}_k \dot{F} = b_k F e^{i(\pi/2-\varphi)} = V_k e^{i(\pi/2-\varphi)}. \quad (38)$$

Комплексная амплитуда скорости изменения длины резистивного элемента

$$\dot{V}_r = \underline{g} \dot{F} = g F e^{-i\varphi} = V_r e^{-i\varphi}. \quad (39)$$

Очевидно, что

$$\dot{V}_m + \dot{V}_k + \dot{V}_r = \dot{V}. \quad (40)$$

Из (37) следует выражение для комплексной амплитуды импульса:

$$\begin{aligned} \dot{P} &= m \dot{V}_m = m b_m F e^{-i(\pi/2+\varphi)} = m \frac{1}{\omega m} F e^{-i(\pi/2+\varphi)} = \\ &= \frac{F}{\omega} e^{-i(\pi/2+\varphi)} = P e^{-i(\pi/2+\varphi)}. \end{aligned} \quad (41)$$

Из (38) следует выражение для комплексной амплитуды производной силы (специального названия не имеет, приводится здесь как дуальный аналог преобразования (16)):

$$\begin{aligned} \dot{B} &= k \dot{V}_k = k b_k F e^{i(\pi/2-\varphi)} = k \frac{\omega}{k} F e^{i(\pi/2-\varphi)} = \\ &= \omega F e^{i(\pi/2-\varphi)} = B e^{i(\pi/2-\varphi)}. \end{aligned} \quad (42)$$

Это соответствует преобразованию

$$kv = k \frac{dx}{dt} = \frac{d(kx)}{dt} = \frac{dF}{dt} = B. \quad (43)$$

Очевидно, что

$$B = \omega F = \omega^2 P. \quad (44)$$

Из (36)–(42) и (7)–(9) следуют амплитудно-частотные характеристики:

$$\begin{aligned} V_m(\omega) &= \frac{V}{\omega m \sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}; \\ P(\omega) &= \frac{V}{\omega \sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}; \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} V_r(\omega) &= \frac{gV}{\sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}; \\ F(\omega) &= \frac{V}{\sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}; \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} V_k(\omega) &= \frac{\omega V}{k \sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}; \\ B(\omega) &= \frac{\omega V}{\sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}. \end{aligned} \quad (47)$$

Очевидно, что

$$V = \sqrt{V_r^2 + (V_k - V_m)^2}. \quad (48)$$

Графики функций $P(\omega)$, $F(\omega)$, $B(\omega)$ ведут себя качественно так же, как, соответственно, $V_m(\omega)$, $V_r(\omega)$, $V_k(\omega)$.

Частота ω_m , на которой функции $P(\omega)$ и $V_m(\omega)$ имеют максимум, определяется из условия

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega^{-1} \left[\left(k^{-1}\omega - m^{-1}\omega^{-1} \right)^2 + r^{-2} \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\begin{aligned} \omega_m &= \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{1 - mk/(2r^2)} = \\ &= \omega_0 \sqrt{1 - x_w^2/(2r^2)} = \omega_0 \sqrt{1 - Q^2/2}. \end{aligned} \quad (49)$$

Тогда

$$\begin{aligned} V_{m \max} &= V_m(\omega_m) = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V; \\ P_{m \max} &= P_m(\omega_m) = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V_m = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} P_0, \end{aligned} \quad (50)$$

где $P_0 = P(0) = Vm$ — постоянный импульс (при нулевой частоте).

Частота ω_r , на которой функции $F(\omega)$ и $V_r(\omega)$ имеют максимум, равна

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_0.$$

Тогда

$$V_{r \max} = V_r(\omega_0) = V; F_{\max} = F(\omega_0) = \frac{V}{g}. \quad (51)$$

Частота ω_k , на которой функции $B(\omega)$ и $V_k(\omega)$ имеют максимум, определяется из условия

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega \left[\left(k^{-1}\omega - m^{-1}\omega^{-1} \right)^2 + r^{-2} \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\omega_k = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{1}{\sqrt{1 - km/(2r^2)}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - Q^2/2}}. \quad (52)$$

Тогда

$$V_{k \max} = V_k(\omega_k) = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V; \\ B_{\max} = B(\omega_k) = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V_k = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} B_0, \quad (53)$$

где $B_0 = B(0) = Vk$ — постоянная производная силы (при нулевой частоте).

При $Q^2/2 > 1$ функции $P(\omega)$, $B(\omega)$, $V_m(\omega)$, $V_k(\omega)$ не имеют максимумов в вещественном диапазоне частот.

Примечательно, что

$$\omega_k \omega_m = \omega_0^2; \quad (54)$$

$$V_{k \max} = V_{m \max}; \quad (55)$$

$$B_{\max} = \omega_0^2 P_{\max}; \quad (56)$$

$$\frac{B_{\max}}{\omega_k} = \omega_m P_{\max} = \frac{F_{\max}}{\sqrt{1 - Q^2/4}}. \quad (57)$$

Другие характерные точки:

$$V_m(\omega_k) = \frac{d - Q/2}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V; P(\omega_k) = \frac{d - Q/2}{\sqrt{1 - Q^2/4}} P_0; \quad (58)$$

$$V_k(\omega_m) = \frac{d - Q/2}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V; B(\omega_m) = \frac{d - Q/2}{\sqrt{1 - Q^2/4}} B_0; \quad (59)$$

$$V_m(\omega_0) = dV; P(\omega_0) = dP_0; \\ V_k(\omega_0) = dV; B(\omega_0) = dB_0; \quad (60)$$

$$V_r(\omega_k) = V_r(\omega_m) = \frac{\sqrt{1 - Q^2/2}}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V;$$

$$F(\omega_k) = F(\omega_m) = \frac{\sqrt{1 - Q^2/2}}{\sqrt{1 - Q^2/4}} \frac{V}{g} = \frac{\sqrt{1 - Q^2/2}}{\sqrt{1 - Q^2/4}} F(\omega_0). \quad (61)$$

Характерные отношения:

$$\frac{V_k(\omega_k)}{V_m(\omega_k)} = \frac{V_m(\omega_m)}{V_k(\omega_m)} = \frac{V_k(\omega_k)}{V_k(\omega_m)} = \frac{V_m(\omega_m)}{V_m(\omega_k)} = \\ = \frac{P(\omega_m)}{P(\omega_k)} = \frac{B(\omega_k)}{B(\omega_m)} = \frac{1}{1 - d^2/2}; \quad (62)$$

$$\frac{V_k(\omega_k)}{V_r(\omega_k)} = \frac{V_m(\omega_m)}{V_r(\omega_m)} = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/2}}; \quad (63)$$

$$\frac{V_k(\omega_m)}{V_r(\omega_m)} = \frac{V_m(\omega_k)}{V_r(\omega_k)} = d\sqrt{1 - Q^2/2}. \quad (64)$$

Амплитуда импульса P имеет максимум на частоте ω_m ($\omega_m < \omega_0$), амплитуда силы F — на частоте ω_0 , амплитуда производной силы B — на частоте ω_k ($\omega_k > \omega_0$).

Амплитуда скорости инертного элемента V_m имеет максимум на частоте ω_m , амплитуда скорости изменения длины упругого элемента V_k — на частоте ω_k .

На частоте ω_0 имеет место *резонанс скоростей*, при котором (реактивные) скорости V_m и V_k равны и противоположны, а их сумма, соответственно, равна нулю [11].

Величина адмитанса механической системы $Y = \sqrt{g^2 + (b_k - b_m)^2}$, характеризующего ее свойство не оказывать сопротивления приводу, понуждающему ее совершать колебания, имеет минимальное значение на частоте ω_0 . Другими словами, именно на частоте ω_0 система оказывает приводу максимальное сопротивление.

Таким образом, резонансной частотой является исключительно ω_0 .

Для системы с параметрами, отличающимися от параметров второй системы тем, что $r = 40$ кг/с, подлинными резонансными кривыми полностью совпадают с изображенными на рис. 3 при заменах $F_k \rightarrow V_m$, $F_m \rightarrow V_k$, $F_r \rightarrow V_r$, $\omega_k \rightarrow \omega_m$, $\omega_m \rightarrow \omega_k$.

Последовательное соединение и источник силы. Антирезонанс скоростей

Порядок рассуждений такой же, как и ранее.
Комплексная амплитуда скорости инертного элемента

$$\dot{V}_m = \underline{b}_m \dot{F} = b_m F e^{-i\pi/2} = V_m e^{-i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда скорости изменения длины упругого элемента

$$\dot{V}_k = \underline{b}_k \dot{F} = b_k F e^{i\pi/2} = V_k e^{i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда скорости изменения длины резистивного элемента

$$\dot{V}_r = \underline{g} \dot{F} = g F e^{i0} = V_r e^{i0}.$$

Очевидно, что

$$\dot{V}_m + \dot{V}_k + \dot{V}_r = \dot{V}.$$

Комплексная амплитуда импульса

$$\begin{aligned} \dot{P} &= m \dot{V}_m = m b_m F e^{-i\pi/2} = \\ &= m \frac{1}{\omega m} F e^{-i\pi/2} = \frac{F}{\omega} e^{-i\pi/2} = P e^{-i\pi/2}. \end{aligned} \quad (65)$$

Комплексная амплитуда производной силы

$$\begin{aligned} \dot{B} &= k \dot{V}_k = k b_k F e^{i\pi/2} = k \frac{\omega}{k} F e^{i\pi/2} = \\ &= \omega F e^{i\pi/2} = B e^{i\pi/2}. \end{aligned} \quad (66)$$

Комплексная амплитуда скорости (см. (1))

$$\dot{V} = \dot{F} \underline{y} = F y e^{i\varphi} = V e^{i\varphi}.$$

Амплитудно-частотная характеристика

$$V(\omega) = F \sqrt{g^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}.$$

При $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$ кривая $V(\omega)$ устремляется в бесконечность. При сверхмалых частотах условие (2) порождает чрезмерный импульс (65), сопровождаемый, соответственно, чрезмерной скоростью инертного элемента. При сверхвысоких частотах условие (2) порождает чрезмерную производную силы (66) и чрезмерную скорость

изменения длины упругого элемента. При ω_0 график проходит через минимум $V_{\min} = V(\omega_0) = Fg = V_r$. Имеет место *антирезонанс скоростей*, при котором (реактивные) скорости V_m и V_k равны и противоположны, а их сумма, соответственно, равна нулю.

Для системы, отличающейся от третьей системы тем, что $F = 100$ Н, подлинная антирезонансная кривая *полностью совпадает* с изображенной на рис. 4 при замене $F \rightarrow V$.

Заключение

Использование символического (комплексного) метода существенно упростило исследование резонансных и околорезонансных явлений, в частности позволило глубоко унифицировать и формализовать рассмотрение различных механических систем (подпункты 1 и 3, 2 и 4 являются дуально инверсными). Громоздкие и трудоемкие операции, связанные с составлением и решением дифференциальных уравнений, заменены простыми алгебраическими преобразованиями.

В основе метода лежат механический аналог закона Ома в комплексном представлении (1) и понятия о механических реактансе, резистансе, импедансе, сассептансе, кондактансе и адмитансе. С помощью этого метода получены новые результаты, в том числе (14), (17)–(33), (40)–(64).

В дополнение к классическому методу рассмотрены последовательное соединение механических элементов и источник скоростей.

Классическое рассмотрение дает одну амплитудно-частотную характеристику, символический (комплексный) метод — восемь при значительно большем числе характерных точек и характерных отношений.

Установлено, что вопреки классическому подходу резонансной частотой является исключительно ω_0 (а не ω_k). Другими словами, резонансная частота не сдвигается от частоты свободных колебаний. Это обусловлено тем, что при классическом рассмотрении не установлена симметрия частот (23), (54), а при символическом она очевидна.

С другой стороны, можно вести речь о трех резонансных частотах: ω_k , ω_m и ω_0 . На первой имеют место *резонанс упругой силы* и *резонанс скорости изменения длины упругого элемента*, на второй — *резонанс инертной силы* и *резонанс скорости инертного элемента*, на третьей — *резонанс резистивной силы* и *резонанс скорости изменения длины резистивного элемента*.

Определены резонанс и антирезонанс сил, резонанс и антирезонанс скоростей, которые не были определены классическим методом. Резонансы возникают при сочетаниях параллельного соединения элементов и источника силы либо последовательного соединения и источника скорости. Антирезонансы возникают при сочетани-

ях параллельного соединения и источника скорости либо последовательного соединения и источника силы.

Для всех описанных случаев *фазочастотные* характеристики особой оригинальностью не отличаются и поэтому не рассматриваются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И. П. Вынужденные колебания механических систем в установившемся режиме // Машиностроение и инженерное образование. 2019. № 4(61). С. 13—19.
2. Попов И. П. Применение символического (комплексного) метода для расчета сложных механических систем при гармонических воздействиях // Прикладная физика и математика. 2019. № 4. С. 14—24. DOI: 10.25791/pfim.04.2019.828.
3. Попов И. П. Расчет механических колебаний в поле комплексных чисел // Тр. МАИ. 2020. № 115. http://mai.ru/upload/iblock/4e9/Popov_vol.pdf. DOI: 10.34759/trd-2020-115-01.
4. Попов И. П. Дифференциальные уравнения двух механических резонансов // Прикладная физика и математика. 2019. № 2. С. 37—40. DOI: 10.25791/pfim.02.2019.599.
5. Попов И. П. Теоретические предпосылки создания мультиинертного осциллятора // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2020. № 1(145). С. 15—19.
6. Попов И. П. Условно-ортогональные механические мощности // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 4(144). С. 15—17.
7. Попов И. П. Алгебраические методы расчета разветвленных механических систем при вынужденных колебаниях // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 5(343). С. 12—20. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-343-5-12-20.
8. Попов И. П. Импедансы и адмитансы механических систем // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 5(343). С. 3—11. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-343-5-3-11.
9. Попов И. П. О резонансе и антирезонансе // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 4. С. 45—48.
10. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. — М.: Наука, 1980. — 512 с.
11. Попов И. П. Разновидности резонансов в механике // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика. 2019. Т. 51. № 1. С. 88—85. DOI 10.18413/2075-4639-2019-51-1-88-95.

RESONANCES AND ANTI-RESONANCES IN MECHANICAL SYSTEMS

I. P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

Resonance and antiresonance of forces, resonance and antiresonance of velocities in mechanical systems are determined.

Keywords: reactance, resistivity, impedance, susceptance, conductance, admittance.

Bibliography — 11 references.

Received January 17, 2021

УДК 685.5.011.56

DOI: 10.52190/1729-6552_2021_2_23

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ВКЛАДА ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОДСИСТЕМ В ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. Ф. Волков, д-р воен. наук; *Д. А. Мосин*, канд. техн. наук;

А. С. Пономарев, канд. воен. наук

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

Проведено исследование проблемы определения вклада разнородных обеспечивающих подсистем в эффективность применения средств поражения. Рассмотрены комбинаторно-векторный подход, экспертный метод и подход, основанный на алгоритмах теории боевой эффективности.

Ключевые слова: обеспечивающая подсистема, организационно-техническая система, эффективность применения, комбинация задействования, экспертное оценивание.

Повышение результативности организационно-технических систем военного назначения связано не только с совершенствованием тактико-технических характеристик (ТТХ) поражающих средств, но и с организацией рационального состава системы обеспечивающих средств. Под обеспечивающими средствами понимают средства, функционирование которых создает условия для успешного ведения боевых действий своих войск и снижения эффективности возможных действий противника. В литературе по исследованию операций отсутствуют методики количественного оценивания вклада различных обеспечивающих систем в эффективность применения боевых средств. Рассмотрим возможные подходы к решению данной задачи.

Применение комбинаторно-векторного подхода

Рассмотрим целенаправленное функционирование некоторой организационно-технической

системы (ОТС), включающей основную подсистему (ОС) и n обеспечивающих подсистем (ОП). Пусть при их задействовании в расчетных (идеальных) условиях эффективность применения ОТС характеризуется показателем W_0 . На момент начала реального применения ОТС возможно проявление неучтенных в проекте технических, организационных и природных рисков, а действия противника могут не соответствовать использованным моделям, возможно также повышение степени неопределенности, обусловленное мероприятиями по информационной безопасности, т. е. требуется доработка обеспечивающих подсистем. Для решения задачи оценивания вклада каждой ОП (с улучшенными ТТХ) в повышение эффективности применения ОТС введем следующие понятия.

Простой назовем комбинацию, отвечающую использованию только одной обеспечивающей подсистемы. Остальные комбинации назовем *сложными*. Общее число комбинаций равно $L = 2^n - 1$, из них простых $L_{\text{п}} = n$, а сложных $L_{\text{с}} = 2^n - (n + 1)$.

Введем следующие обозначения: W_i — скалярный показатель эффективности функционирования ОТС при применении i -й ОП (что соответствует i -й простой комбинации, $i = 1(1)n$); W_{ci} — скалярный показатель эффективности функционирования ОТС при применении всех n ОП за исключением одной с номером $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$; W_j — скалярный показатель эффективности функционирования ОП при осуществлении мероприятий, отвечающих про-

Волков Валерий Федорович, профессор кафедры "Системный анализ и математическое обеспечение АСУ (войсками)".

E-mail: vka@mil.ru

Мосин Дмитрий Александрович, доцент, начальник кафедры "Системный анализ и математическое обеспечение АСУ (войсками)".

E-mail: vka@mil.ru

Пономарев Александр Сергеевич, преподаватель кафедры "Системный анализ и математическое обеспечение АСУ (войсками)".

E-mail: vka@mil.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2021 г.

© Волков В. Ф., Мосин Д. А., Пономарев А. С., 2021

извольной j -й комбинации ($j = 1(1)L$). Введем в рассмотрение показатели

$$V_j = w_j - w_0, \quad j = 1(1)n, \quad (1)$$

характеризующие эффект от использования ОП в j -й комбинации. Показатели V_j условно будем называть простыми, а показатели V_{cj} — сложными ($i = (n+1)(1)L$). Сложный показатель V_{cL} будем называть полным показателем и обозначать V_Π .

Например, при $n = 3$

$L = 2^3 - 1 = 7$, $L_\Pi = 3$, $L_c = 7 - 3 = 4$, показатели V_1, V_2, V_3 — простые, показатели $V_{c4} = V_{12} = W_{12} - W_0$; $V_{c5} = V_{13} = W_{13} - W_0$; $V_{c6} = V_{23} = W_{23} - W_0$; $V_{c7} = V_{123} = W_{123} - W_0 = W_n$ — сложные, а показатель $V_{c7} = V_{123} = W_{123} - W_0 = W_n$ — полный.

В реальных ситуациях любой сложный показатель V_{ci} ($i = 1(1)L$), отвечающий i -й комбинации ОП, будет всегда меньше или больше суммы соответствующих простых показателей:

$$V_{ci} < \sum_i V_i \quad \text{или} \quad V_{ci} > \sum_i V_i. \quad (2)$$

Например, при $n = 3$

$$V_{c4} = V_{12} \leq V_1 + V_2; \quad V_{c5} = V_{13} \leq V_1 + V_3;$$

$$V_{c6} = V_{23} \leq V_2 + V_3; \quad V_n = V_{123} \leq V_1 + V_2 + V_3.$$

Рассмотрим методику решения задачи определения коэффициентов значимости. Тогда $V_{ci} < \sum_i V_i$. Будем рассматривать показатели j -й комбинации мероприятий в виде двумерных векторов

$$\mathbf{V}_j = \langle v_{j1}, v_{j2} \rangle; \quad (3)$$

$$|\mathbf{V}_j| = \sqrt{v_{j1}^2 + v_{j2}^2} = V_j [j = I(I)L]. \quad (4)$$

Для "векторизованных" сложных показателей будут иметь место соотношения

$$\mathbf{V}_\Pi = \sum_{i=1}^n \mathbf{V}_i; \quad (5)$$

$$\mathbf{V}_\Pi = \mathbf{V}_i + \mathbf{V}_{ci}, \quad (6)$$

где \mathbf{V}_{ci} — сложный "векторизованный" показатель, характеризующий эффект от применения всех n обеспечивающих подсистем за исключением подсистемы с номером i .

Алгебраическая проекция суммы векторов и направления вектора \mathbf{V}_Π будет равна сумме алгебраических проекций векторов на это же направление и равна модулю вектора \mathbf{V}_Π :

$$\begin{aligned} n\rho_{\mathbf{V}_\Pi} \sum_{i=1}^n \mathbf{V}_i &= \sum_{i=1}^n n\rho_{\mathbf{V}_\Pi} \mathbf{V}_i = |\mathbf{V}_\Pi| = V_\Pi; \\ n\rho_{\mathbf{V}_\Pi} V_i + n\rho_{\mathbf{V}_\Pi} V_{ci} &= |\mathbf{V}_\Pi| = V_\Pi. \end{aligned} \quad (7)$$

Из этих соотношений следует, что

$$\frac{1}{V_\Pi} \sum_{i=1}^n n\rho_{\mathbf{V}_\Pi} \mathbf{V}_i + \frac{1}{V_\Pi} \sum_{i=1}^n n\rho_{\mathbf{V}_\Pi} \mathbf{V}_{ci} = n. \quad (8)$$

Отношения

$$\frac{n\rho_{\mathbf{V}_\Pi} \mathbf{V}_i}{V_\Pi} = \beta_i^1 \quad \text{и} \quad \frac{n\rho_{\mathbf{V}_\Pi} \mathbf{V}_{ci}}{V_\Pi} = \beta_{ci}^1 \quad (9)$$

соответствуют относительным длинам проекции векторов \mathbf{V}_i , \mathbf{V}_{ci} на направление вектора \mathbf{V}_Π , причем

$$\beta_i^1 + \beta_{ci}^1 = 1, \quad i = I(I)n. \quad (10)$$

С учетом выражений (9) соотношение (8) примет вид

$$\sum_{i=1}^n \beta_i^1 + \sum_{i=1}^n \beta_{ci}^1 = n. \quad (11)$$

Отсюда

$$\beta_i^1 = \frac{\beta_i^1}{n - \sum_{i=1}^n (1 - \beta_i^1)}, \quad i = I(I)n. \quad (12)$$

Из аналитической геометрии известно, что

$$n\rho_{\mathbf{V}_\Pi} \mathbf{V}_i = |\mathbf{V}_i| \cos \left(\widehat{\mathbf{V}_\Pi, \mathbf{V}_i} \right). \quad (13)$$

Обозначим

$$\cos \left(\widehat{\mathbf{V}_\Pi, \mathbf{V}_i} \right) = \lambda_i. \quad (14)$$

Тогда

$$\beta_i^1 = \frac{V_i \lambda_i}{V_{\Pi}}, \quad i = I(I)n. \quad (15)$$

Используя теорему косинусов и соотношение (6), получаем

$$\beta_i^1 = \frac{V_{\Pi}^2 + V_i^2 + V_{ci}^2}{2V_n}, \quad i = I(I)n. \quad (16)$$

Рассмотрим другой подход к решению задачи. Обозначим через: V_{ci} — показатель, характеризующий эффект от применения всех ОП, кроме ОП i . Так как больший вклад дает использование той ОП i , для которой наибольшей является разность $\Delta V_i = V_{\Pi} - V_{ci}$, коэффициенты β_i можно определить следующим образом:

$$\beta_i = \frac{\Delta V_i}{\sum_{i=1}^n \Delta V_i} = \frac{\Delta V_i}{\sum_{i=1}^n (V_{\Pi} - V_{ci})}. \quad (17)$$

Пример. Пусть в целях повышения эффективности некоторой ОТС в конкретной ситуации планируется использовать наземную разведку (с применением оптических и звукометрических устройств), радиотехническую разведку, авиационную разведку. Исходные данные (гипотетические значения показателей, отвечающие j -м комбинациям, $j = 0(I)L$, $L = 2^n - 1 = 7$) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

W_0	W_1	W_2	W_3	$W_4=W_{12}$	$W_5=W_{13}$	$W_6=W_{23}$	$W_7=W_{123}$
0,2	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,9

Требуется найти значения весовых коэффициентов, характеризующих вклад каждой ОП в повышение функционирования ОТС.

Решение. На основе соотношения (4) найдем значения V_j ($j = 1(1)7$; табл. 2).

Таблица 2

Найденные значения V_j

V_1	V_2	V_3	$V_{c4} = V_{12}$	$V_{c5} = V_{13}$	$V_{c6} = V_{23}$	$V_{\Pi} = V_{123}$
0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,7

При использовании первого подхода значения β_i определяют по формуле (12). Предвари-

тельно исходя из (16) получим значение коэффициентов β_i^1 ($i = 1(1)3$):

$$\beta_1^1 = \frac{0,7^2 + 0,2^2 - 0,4^2}{2 \cdot 0,7^2} = 0,3775;$$

$$\beta_2^1 = \frac{0,7^2 + 0,3^2 - 0,3^2}{2 \cdot 0,7^2} = \frac{1}{2} = 0,5;$$

$$\beta_3^1 = \frac{0,7^2 + 0,4^2 - 0,2^2}{2 \cdot 0,7^2} = \frac{0,61}{0,98} = 0,6225;$$

$$\sum_{i=1}^3 (1 - \beta_i^1) = 0,3775 + 0,5 + 0,6225 = 1,5.$$

Подставляя значение β_i^1 ($i = 1(1)3$) в формулу (12), имеем

$$\beta_1 = 0,25; \quad \beta_2 = 0,33; \quad \beta_3 = 0,42.$$

Для использования второго подхода вычислим по (15) значения ΔV_i :

$$\Delta V_1 = V_{\Pi} - V_{c1} = V_{\Pi} - V_{23} = 0,3;$$

$$\Delta V_2 = V_{\Pi} - V_{c2} = V_{\Pi} - V_{13} = 0,4;$$

$$\Delta V_3 = V_{\Pi} - V_{c3} = V_{\Pi} - V_{12} = 0,7 - 0,2 = 0,5$$

В соответствии с формулой (17) имеем

$$\beta_1 = \frac{0,3}{1,2} = 0,25; \quad \beta_2 = \frac{0,4}{1,2} = 0,33; \quad \beta_3 = \frac{0,5}{1,2} = 0,42.$$

Вывод. Значения коэффициентов β_i ($i = 1(1)3$), полученные по алгоритмам для первого и второго подходов, практически совпадают. В рамках принятых допущений наибольший вклад в повышение эффективности ОТС вносит третья подсистема.

Применение метода экспертных оценок

В более общей постановке задача оценивания вклада обеспечивающих подсистем в эффективность применения ОТС формулируется как задача расчета коэффициентов относительной важности проводимых мероприятий. Результаты ее решения используют при выработке рекомендаций по вариантам действий. К методам экспертных оценок прибегают при отсутствии достаточно представительной и достоверной статистики, в условиях неизбежной неопределенности при средне- и долгосрочном прогнозировании, при дефиците времени в экстремальных

ситуациях. Дополнительные сложности обусловлены отсутствием гармонизированного регулирования в сфере кибербезопасности. Эта проблема обостряется в связи с проникновением цифровых технологий во все сферы, включая военное дело [1–3]. Объем первичной информации в системах автоматизированного проектирования (САПР) конструкторских бюро (КБ) оборонно-промышленного комплекса (ОПК) будет неизбежно расти вследствие внедрения новых информационных технологий (облачных вычислений для больших данных различного типа, алгоритмов машинного обучения, технологий геоинформационного управления пространственно-разнесенными системами, алгоритмов анализа неупорядоченных массивов текстовых материалов, технологий математического обеспечения скоростной аналитики распознавания объектов). Кроме того, необходимость в экспертных оценках связана с информационными трудностями, обусловленными высокой степенью нестабильности мировой экономики и военно-политической обстановки. К данному классу факторов относятся следующие:

- неопределенность, связанная с действием (ожиданием) санкций в отношении производителей комплектующих для продукции ОПК;
- стохастическое совмещение различных локальных потребительских циклов и циклов производства базового высокотехнологичного оборудования;
- сложности форсированного развертывания системы многомерного анализа данных (в интересах создания цифровых платформ для сбора информации о потребителях, посредниках и поставщиках);
- непредсказуемость изменений в поведенческих отношениях между партнерами и акционерами и вынужденных инвестиционных и технологических акций, затягивание сроков реинжиниринга и перепланирования при смене контролирующего акционера;
- случайный характер степени недоосвоенности выделенных денежных средств по окончании текущего цикла реализации проекта;
- заключение странами НАТО "рамочного" соглашения по космической стратегии, объявление о создании кибервойск в США, участвующая смена стратегических концепций типа "Глобального удара", "Гибридной войны", "Сетевидной войны".

Рассмотрим оперативно-стратегические аспекты исследуемой проблемы. Пусть возможными стратегическими целями и задачами явля-

ются: A_1 — срыв готовящейся агрессии; A_2 — отражение нападения; A_3 — захват стратегической инициативы; A_4 — создание выгодных условий для быстрого окончания войны; A_5 — обеспечение выживаемости страны; A_6 — демонстрация силы. Приведем типовой перечень возможных мероприятий, обеспечивающих достижение перечисленных целей:

- M_1 — эпизодические боевые действия (с применением беспилотных летательных аппаратов — БПЛА);
- M_2 — символический показ силы (с публикацией материалов о завершении испытаний смертоносных автономных систем вооружения);
- M_3 — ультиматум о применении оружия (с публикацией сообщений о завершении разработок гибридного вооружения с ядерными боезарядами малой мощности);
- M_4 — выход из Договора по открытому небу, нанесение обезоруживающего удара (с применением новых типов оружия);
- M_5 — вооруженное столкновение ограниченными силами (с применением крылатых ракет и разведывательных БПЛА);
- M_6 — военные действия более широкого масштаба (с применением крылатых ракет и ударных БПЛА);
- M_7 — ограниченная война с применением крылатых ракет, ударных и разведывательных БПЛА;
- M_8 — неограниченная война (с применением гиперзвуковых ЛА, крылатых ракет, ударных БПЛА, боевых роботов и новых баллистических ракет наземного базирования средней дальности).

Конечное значение коэффициентов K_i относительной важности мероприятий определяется как сумма произведений коэффициентов целей K_{Mj} и соответствующих элементов K_{Ki} :

$$K_i = \sum_{j=1}^m K_{Mj} K_{Ki}, \quad (18)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m.$$

Рассмотрим пример, когда в результате экспертного опроса (о значимости каждого мероприятия) получены коэффициенты, представленные в табл. 3. Полученные расчетные данные заносят в графу "Общий коэффициент K_{Ai} ". Далее можно проводить анализ и делать соответствующие выводы.

Таблица 3

Матрица результатов экспертного опроса

Основное мероприятие	Коэффициенты K_{Mj} стратегических целей и задач						Общий коэффициент K_{Aj}
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	
	$K_{K1} = 0,4$	$K_{K2} = 0,1$	$K_{K3} = 0,2$	$K_{K4} = 0,1$	$K_{K5} = 0,15$	$K_{K6} = 0,05$	
M ₁	0,1	0,05	0,025	0,1	0,025	0,05	0,066
M ₂	0,05	0,05	0,05	0,05	0,025	0,2	0,07
M ₃	0,05	0,05	0,05	0,05	0,025	0,05	0,08
M ₄	0,4	0,2	0,4	0,5	0,5	0,2	0,31
M ₅	0,05	0,05	0,025	0,05	0,1	0,05	0,065
M ₆	0,05	0,05	0,025	0,05	0,05	0,1	0,059
M ₇	0,2	0,5	0,4	0,1	0,25	0,3	0,284
M ₈	0,1	0,05	0,025	0,1	0,025	0,05	0,066
Сумма коэффициентов	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Основные трудности в принятии решений по результатам экспертного оценивания связаны с величиной ошибки репрезентативности, т. к. количество компетентных экспертов может быть недостаточным, а проверка гипотезы о случайности в несовпадении мнений опрошенных экспертов (после расчета коэффициента конкордации) может дать отрицательный результат.

Применение методов теории боевой эффективности

В "классической" теории эффективности [4–6] качество результатов операции применения ОТС описывается вектором

$$Y_{\langle 3 \rangle} = \langle \mathcal{A}, R, T \rangle, \quad (19)$$

где $\mathcal{A} = \mathcal{A}_{\langle \text{п1} \rangle}$, $R = R_{\langle \text{п2} \rangle}$, $T = T_{\langle \text{п3} \rangle}$ — показатели результативности, затратности и оперативности применения ОТС соответственно.

Как следствие вероятность выполнения боевой задачи $P_{6.3}$ (в более общем случае — вероятность достижения цели $P_{\text{д.ц}}$) рассчитывается как функция ТТХ ОТС, параметров организации целенаправленного процесса применения ОТС и характеристик условий функционирования ОТС.

Для оценивания вклада обеспечивающих подсистем рассмотрим структуру вектора аргументов величины $P_{6.3}$ с других позиций. Пусть известна зависимость $P_{6.3} = f(\sigma_i, t_i, \psi)$, где σ_i и t_i — точностные и временные характеристики i -го средства обеспечения стрельбы; ψ — вектор характеристик группы факторов, не связанных с

обеспечивающими подсистемами. Тогда для предварительной оценки влияния OP_i предлагается целесообразным использовать формулу, соответствующую разложению целевой функции в ряд Тейлора с сохранением слагаемых только первого порядка. Вследствие зависимости большинства параметров величины $P_{6.3}$ от пространственно-временных характеристик конкретного сценария частные производные $\frac{\partial P_{6.3}}{\partial \sigma_i}$,

$\frac{\partial P_{6.3}}{\partial t_i}$ могут быть рассчитаны только численными методами с использованием моделей, "заточенных" под фиксированные исходные данные и ограничения. Например, для средств малой и средней дальности [7, 8] для оценивания вклада суммарных срединных ошибок по каждому фактору необходимо использовать выражения

$$\Delta P_{6.3} = \sum \frac{\partial P_{6.3}}{\partial f_i} \Delta f_i,$$

где f_i — составляющие векторов средств разведки, топогеодезического обеспечения, геофизического обеспечения, средств подготовки данных и баллистического обеспечения. В большинстве боевых ситуаций существенный вклад в обеспечение требуемого значения $P_{6.3}$ вносят значения срединных ошибок определения координат целей и средств поражений. Соответствующие выражения для расчета этих величин также могут быть представлены в виде, позволяющем оценить вклад тех или иных составляющих. Например, при анализе движения средств большой дальности на участке разведе-

ния составляющие отклонений боеголовок от точек прицеливания по дальности ΔL и направлению ΔB могут быть оценены по зависимостям

$$\begin{aligned}\Delta L_{GPS} &= \sqrt{\sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial L}{\partial q_j} \Delta q_j \right)^2}; \\ \Delta B_{GPS} &= \sqrt{\sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial B}{\partial q_j} \Delta q_j \right)^2},\end{aligned}\quad (20)$$

где Δq_j — предельные погрешности навигационных определений параметров движения r_X , r_Y ,

r_Z , V_X , V_Y и V_Z ; $\frac{\partial L}{\partial q_j}$, $\frac{\partial B}{\partial q_j}$ — частные производные функций дальности и отклонений в бо-

ковом направлении по параметрам движения ступени разведения. Используя (20), значения производных и погрешностей для конкретной системы, можно получить составляющие рассеивания из-за погрешностей навигационных определений. Например, при наведении боевых блоков по KHC NAVSTAR они равны [9]

$$\Delta L_{GPS} = 186\text{—}215 \text{ м}; \quad \Delta B_{GPS} = 32\text{—}33 \text{ м}.$$

Следует отметить, что в работах [7—11] при рассмотрении алгоритмов решения прямых и обратных задач теории эффективности не учитывается связь между аргументами целевой функции (соответствующими, как правило, нижним уровням системы моделей) и вероятностью выполнения боевой задачи $P_{б.з.}$. Наличие этой зависимости (например, между изменением математического ожидания целевого параметра и изменением среднеквадратического отклонения) связано с тем, что они определяются, возможно, одними и теми же эксплуатационно-техническими характеристиками (ЭТХ) и условиями функционирования ОТС. Следовательно, при определенных комбинациях увеличение математического ожидания приведет не к максимизации, а к уменьшению вероятности выполнения задачи.

Универсальных аналитических методик нахождения взаимосвязи вариаций ЭТХ, параметров обстановки, изменений математического ожидания и изменений среднеквадратического отклонения не существует, т. к. любой соответствующий алгоритм определяется не только законом распределения показателя результативности, но и иерархией параметров технических устройств и оборудования, конструктивной схемой инфраструктурных блоков, характеристиками уровней информационного контура ОТС.

Перечисленные исходные данные всегда конкретны, "не вписываются" в общие описательные модели. Поэтому в интересах оценивания вкладов ОП в эффективность ОТС необходимо реализовывать имитационные модели, в которых должно быть предусмотрено адаптированное обращение лица, принимающего решение (ЛПР), к генератору вариантов боевых ситуаций. Далее по результатам моделирования составляют уравнения регрессии, связывающие рост (уменьшение) вероятности выполнения задачи с изменениями ЭТХ, динамикой обстановки, увеличением математического ожидания и изменением дисперсии.

Заключение

За последние десятилетия резко возросла роль информационного обеспечения применения ударных комплексов с неядерным оснащением [3—5]. В литературе по исследованию операций [6—14] отсутствуют методики количественной оценки вклада различных обеспечивающих (в том числе космических) систем в эффективность применения боевых средств. При оптимизации кластера обеспечивающих подсистем должны решаться следующие задачи: обоснование требований к точностным и временным характеристикам средств обеспечения; выбор рационального (по соответствующему скалярному или векторному показателю) варианта структуры обеспечивающей подсистемы; определение оптимальных сроков замены одного средства обеспечения другим. Указанные частные задачи относятся к классу обратных задач теории эффективности. Без получения количественных оценок вклада различных ОП их решение может осуществляться только на концептуальном уровне. Рассмотренные задачи актуальны и для предприятий оборонного комплекса, рентабельность которых зависит как от организации непосредственно производства, так и от организации взаимодействия с заказчиками, процессов снабжения электроэнергией, сырьем и комплектующими, транспортной инфраструктуры, т. е. по аналогии с боевым и тыловым обеспечением войск можно говорить о логистическом, маркетинговом, транспортном и других видах обеспечения. Поэтому изложенные три возможных подхода к определению вклада разнородных обеспечивающих подсистем в эффективность применения средств поражения могут быть использованы как на начальных этапах планирования применения ОТС, так и в научно-исследовательских подразделениях холдингов ОПК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А. И., Буренок В. М., Турко Н. И. Перспективы военно-гражданской интеграции // Национальная безопасность. 2017. № 3. С. 30—39.
2. Буренок В. М., Горчица Г. И., Пишков В. Н. и др. Развитие систем компьютерного моделирования боевых действий с использованием полномасштабных технологий формирования виртуальной реальности // Изв. РАН. 2017. № 96. С. 3—8.
3. Кежаев В. А., Кулешов Ю. В., Сурувикин С. В. Актуальные проблемы развития теории управления группировками войск (сил) в интересах повышения эффективности огневого поражения противника с целью локализации международного вооруженного конфликта // Изв. РАН. 2018. № 1(101). С. 24—32.
4. Волков В. Ф. Применение космических средств при обеспечении боевых действий в зоне Персидского залива. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 1995. — 60 с.
5. Палкин М. В. Повышение эффективности летательных аппаратов путем перераспределения ресурсов штатных подсистем // Наука и образование. 2012. № 2. С. 72—77.
6. Лысенко И. В., Юсупов Р. М. Эффективность функционирования и другие операционные свойства систем: задачи и метод оценивания // Труды СПИИРАН. 2018. № 60. С. 241—270.
7. Иванцов А. В., Пасичник С. И., Албузов А. Т. Методический подход к оценке эффективности поражения площадных групповых объектов управления противника подразделениями огневых комплексов // Военная мысль. 2018. № 12. С. 92—95.
8. Ачасов О. Б., Буравлев А. И. Аналитическая модель оценки эффективности глобального удара высокоточным оружием // Вооружение и экономика. 2014. № 2(27). С. 10—20.
9. Дворкин В. З. и др. Технические основы эффективности ракетных систем. — М.: Машиностроение, 1987. — 400 с.
10. Чуев Ю. В. и др. Основы исследования операций в военной технике. — М.: Сов. радио, 1965. — 280 с.
11. Микрюков В. Ю. Теория взаимодействия войск. — М.: Вузовская книга, 2002. — 240 с.
12. Старчак С. Л., Селиванов Р. А., Вафин М. А., Топорков А. Г. Уточнение модели обобщенного потребителя в методике оценки вклада космических систем в эффективность боевых действий // Инженерный вестник. 2013. № 9. С. 533—548.
13. Турко Н. И., Венедиктов А. А. Опыт финансового обеспечения группировок ВС СССР и России в локальных войнах, военных конфликтах, миротворческих и контртеррористических операциях после Великой Отечественной войны // Вооружение и экономика. 2020. № 2(52). С. 56—69.
14. Мировая военная промышленность в 2018 году // Экономист. 2019. № 12. С. 88—90.

RESEARCH OF SUPPORTING SUBSYSTEMS CONTRIBUTION EVALUATING TO EFFECTIVENESS OF PURPOSEFUL ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS APPLICATION

V. F. Volkov, D. A. Mosin, A. S. Ponomarev

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

It is conducting the research of problem of evaluating the contribution of heterogeneous supporting subsystems to effectiveness of destruction means. It is seemed combinatorial-vector approach based on algorithms of combat effectiveness theory.

Keywords: supporting subsystems, organizational and technical systems, effectiveness of application, combination of engaging, expert evaluating.

Bibliography — 14 references.

Received January 20, 2021

УДК 620.179.14

DOI: 10.52190/1729-6552_2021_2_30

ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА ФУНКЦИЮ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФЕРРОЗОНДОВ ПРИ ОДНОПОЛЯРНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

В. С. Безкорвайный, канд. техн. наук; В. В. Яковенко, д-р техн. наук;
Ю. В. Креселюк

Луганский государственный университет им. Владимира Даля, г. Луганск,
Луганская Народная Республика

Предложена методика оценки влияния активно-емкостной нагрузки на функцию преобразования феррозондов при однополярном импульсном возбуждении. Приведены результаты численных расчетов формы выходного сигнала феррозондов при разных вариациях активно-емкостной нагрузки.

Ключевые слова: феррозонд, однополярное импульсное возбуждение, нагрузка, функция преобразования, импульс, колебательный процесс, выходной сигнал.

Малая длительность выходного импульса феррозондов, входящих в состав датчиков механических величин, при однополярном импульсном возбуждении [1–3] требует учета влияния активно-емкостной нагрузки, которая оказывает значительное влияние на функцию преобразования феррозондов. Емкость нагрузки C состоит из распределенной межвитковой емкости вторичной обмотки, емкости кабеля и выходной емкости каскада преобразователя выходного сигнала [4]. При определенном соотношении емкости и активного сопротивления нагрузки в выходной обмотке феррозонда может возникать колебательный процесс, который следует учитывать при проектировании схем селекции выходных сигналов по полярности.

Влияние активно-емкостной нагрузки на функцию преобразования феррозондов

При расчете переходного процесса в выходной обмотке феррозонда допускается следующее:

- ДМП сердечников в момент образования выходного импульса — величина постоянная, равная $\mu(H) = 0,5\mu_m$;

Безкорвайный Владимир Сергеевич, доцент.

E-mail: volk_7@ukr.net

Яковенко Валерий Владимирович, профессор.

E-mail: kaf-el-mex@yandex.ru

Креселюк Юрий Владимирович, старший преподаватель.

E-mail: yurakreselyuk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2021 г.

© Безкорвайный В. С., Яковенко В. В.,
Креселюк Ю. В., 2021

- поскольку вторичные обмотки сердечников a и b включены встречно, взаимная индуктивность между контуром возбуждения и контуром выходной обмотки равна

$$\Delta M = M_a - M_b.$$

В формуле для изображения эквивалентного сопротивления относительно выходных зажимов 1, 2 (рис. 1):

$$Z_{\text{эк}}(P) = \frac{rL_2P + (L_1L_2 - \Delta M^2)P^2}{r + L_1P}$$

где L_1 , L_2 — линеаризованная индуктивность обмотки возбуждения и выходной обмотки соответственно, величиной ΔM^2 можно пренебречь, так как $\Delta M^2 \ll L_1L_2$, и считать, что выходной контур феррозонда не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на контур возбуждения, то есть

$$Z_{\text{эк}}(P) = PL_2. \quad (1)$$

Напряжение холостого хода феррозонда при однополярном импульсном возбуждении аппроксимируется следующей функцией:

$$U_{2x}(t) = \begin{cases} \frac{U_{2mx}(t-t_1)}{t_m-t_1} & \text{при } t_1 \leq t \leq t_m; \\ -\frac{U_{2mx}(t-t_m)}{t_u-t_m} + U_{2mx} & \text{при } t_m \leq t \leq t_u; \\ 0 & \text{при } t \geq t_u. \end{cases} \quad (2)$$

Используя теорему об эквивалентном генераторе, изображение по Лапласу выходного

напряжения феррозонда можно определить по следующей формуле:

$$U_2(P) = \frac{U_{2x}(P)Z_H(P)}{Z_{ЭК}(P) + Z_H(P)}; \quad (3)$$

$$U_{2x}(P) = \frac{U_{2m}e^{-pt_1}}{(t_m - t_1)P^2} - \frac{U_{2m}(t_u - t_1)e^{-pt_m}}{(t_u - t_m)(t_m - t_1)P^2} + \frac{U_{2mx}(t_u - t_1)e^{-pt_u}}{(t_u - t_m)(t_m - t_1)P^2}, \quad (4)$$

где $Z_H(P)$ — изображение сопротивления нагрузки, которое согласно принципиальной электрической схеме, показанной на рис. 1, равно

$$Z_H(P) = \frac{r_H}{r_H CP + 1}, \quad (5)$$

а $U_{2x}(P)$ — изображение напряжения холостого хода.

С учетом (1), (4) и (5) изображение выходного сигнала феррозонда (3) равно

$$U_2(P) = \frac{U_{2mx}}{L_2 C(t_m - t_1)P^2 \left(P^2 + 2\delta P + \frac{1}{L_2 C} \right)} \times \left(e^{-pt_1} - \frac{t_u - t_1}{t_u - t_m} e^{-pt_m} + \frac{t_u - t_1}{t_u - t_m} e^{-pt_u} \right), \quad (6)$$

где

$$\delta = \frac{1}{2r_H C}; \quad L_2 = \frac{\mu_0 \mu_m W_2^2 S}{2l}.$$

Оригиналом (6) при $r_H < 0,5\sqrt{\frac{L_2}{C}}$ будет следующая зависимость:

$$U_2(t) = \frac{U_{2mx}}{t_m - t_1} \times \left[t - t_1 - \frac{L_2}{r_H} + \frac{1}{L_2 C(P_1 - P_2)} \left(\frac{e^{P_1(t-t_1)}}{P_1^2} - \frac{e^{P_2(t-t_1)}}{P_2^2} \right) \right] \times \times 1(t - t_1) - \frac{U_{2mx}(t_u - t_1)}{(t_m - t_1)(t_u - t_m)} \times \times \left[t - t_m - \frac{L_2}{r_H} + \frac{1}{L_2 C(P_1 - P_2)} \left(\frac{e^{P_1(t-t_m)}}{P_1^2} - \frac{e^{P_2(t-t_m)}}{P_2^2} \right) \right] \times \times 1(t - t_m) + \frac{U_{2mx}(t_u - t_1)}{(t_m - t_1)(t_u - t_m)} \times \times \left[t - t_u - \frac{L_2}{r_H} + \frac{1}{L_2 C(P_1 - P_2)} \left(\frac{e^{P_1(t-t_u)}}{P_1^2} - \frac{e^{P_2(t-t_u)}}{P_2^2} \right) \right] \times \times 1(t - t_u), \quad (7)$$

где

$$P_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \frac{1}{L_2 C}}.$$

При $r_H > 0,5\sqrt{\frac{L_2}{C}}$ оригинал изображения (6) имеет вид

$$U_2(t) = \frac{U_{2mx}}{t_m - t_1} \times \left\{ t - t_1 - \frac{L_2}{r_H} + \frac{e^{-\delta(t-t_1)}}{\omega_0} \sin[\omega_0(t - t_1) - \psi] \right\} \times \times 1(t - t_1) - \frac{U_{2mx}(t_u - t_1)}{(t_m - t_1)(t_u - t_m)} \times \times \left\{ t - t_m - \frac{L_2}{r_H} + \frac{e^{-\delta(t-t_m)}}{\omega_0} \sin[\omega_0(t - t_m) - \psi] \right\} \times \times 1(t - t_m) + \frac{U_{2mx}(t_u - t_1)}{(t_m - t_1)(t_u - t_m)} \times \times \left\{ t - t_u - \frac{L_2}{r_H} + \frac{e^{-\delta(t-t_u)}}{\omega_0} \sin[\omega_0(t - t_u) - \psi] \right\} \times \times 1(t - t_u), \quad (8)$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_2 C}}; \quad \psi = \arctg \frac{2\delta\omega_0}{\delta^2 - \omega_0^2}.$$

Таким образом, в выходной цепи феррозонда при однополярном импульсном возбуждении возможны два режима: аperiodический и колебательный. Для того чтобы уменьшить выделение помехи на нагрузке, ее величину следует выбирать небольшой. В то же время при этом уменьшается влияние емкости нагрузки на функцию преобразования феррозонда.

Численный расчет формы выходного сигнала феррозонда

На рис. 1—3 приведены графики функции $U_2(t)$ при различных значениях r_H и C .

Видно, что нагрузка существенно влияет как на форму, так и на амплитуду выходных импульсов. Особенно сильным это влияние оказывается при $r_H > 0,5\sqrt{\frac{L_2}{C}}$ (рис. 2).

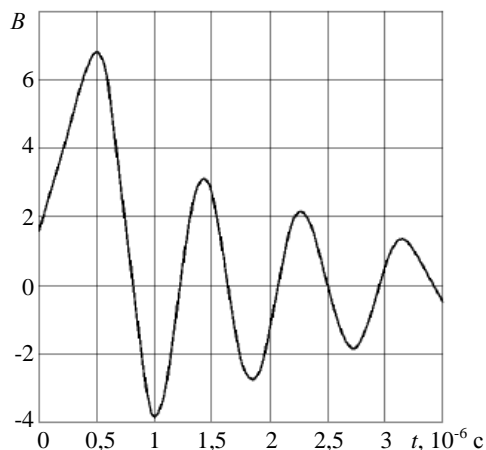


Рис. 1. Форма выходного сигнала феррозонда при

$r_H > 0,5\sqrt{\frac{L_2}{C}}$ ($r_H = 1000 \text{ Ом}$; $C = 0,01 \text{ мкФ}$; $L_2 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$)

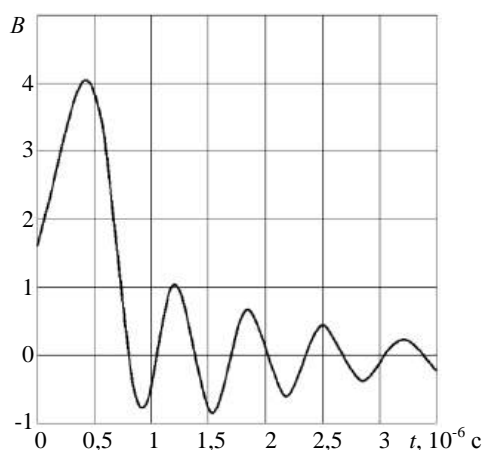


Рис. 2. Форма выходного сигнала феррозонда при

$r_H > 0,5\sqrt{\frac{L_2}{C}}$ ($r_H = 500 \text{ Ом}$; $C = 0,01 \text{ мкФ}$; $L_2 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$)

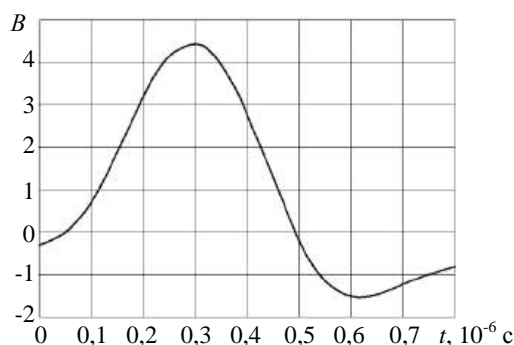


Рис. 3. Форма выходного сигнала феррозонда при

$r_H < 0,5\sqrt{\frac{L_2}{C}}$ ($r_H = 100 \text{ Ом}$; $C = 100 \text{ пФ}$; $L_2 = 25 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$)

Для учета указанного влияния в функцию преобразования феррозонда следует ввести множитель

$$k(r_H, C) = 1 - \frac{L_2}{r_H(t_m - t_1)} + \frac{1}{L_2 C (P_1 - P_2)} \times \left(\frac{e^{P_1(t_m - t_1)}}{P_1^2} - \frac{e^{P_2(t_m - t_1)}}{P_2^2} \right) \frac{1}{t_m - t_1}. \quad (9)$$

Зависимость множителя (9) от величин элементов r_H , C , L_2 и значения $t_m - t_1$ показана на рис. 4 и 5. При расчете колебательного режима ($r_H > 0,5\sqrt{L_2 / C}$) следует использовать все выражения (8).

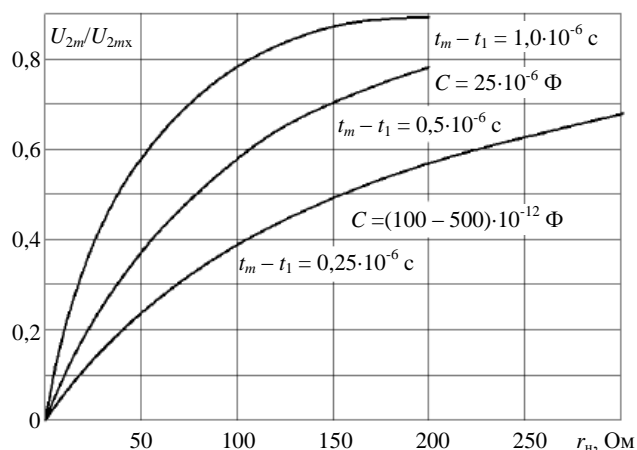


Рис. 4. Влияние нагрузки на амплитуду выходного импульса феррозонда при его различных длительностях

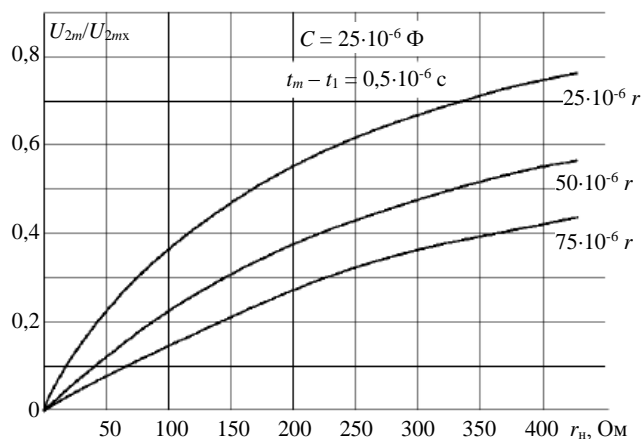


Рис. 5. Влияние нагрузки на амплитуду выходного импульса феррозонда при различных значениях L_2

Заключение

Функция преобразования феррозонда при однополярном импульсном возбуждении зависит от величины и характера нагрузки.

Влияние нагрузки можно учесть путем введения множителя, зависящего от параметров выходного импульса феррозонда и сопротивления нагрузки.

Величину активного сопротивления нагрузки следует выбирать из условия получения апериодической формы напряжения выходного сигнала феррозонда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковенко В. В., Букреев В. В., Берёзкина И. А. Математическое моделирование импульсного режима возбуждения феррозонда // Мат. та комп'ют. моделювання. Сер. Техн. науки. 2012. Вип. 7. С. 246—253.
2. Яковенко В. В., Павлюков В. Ф., Воробьёв Н. Г. К расчёту коэффициента преобразования магнитомодуляционных измерительных преобразователей с импульсным возбуждением // Приборостроение. 1983. № 5. С. 32—36.
3. Яковенко В. В., Мирошников В. В. Функция преобразования феррозонда при однополярном импульсном возбуждении // Измерительная техника. 1988. № 8. С. 51.
4. Берёзкина И. А. Математическая модель резонансного режима работы выходной цепи феррозонда // Вісник Запорізького національного університету: Збірник наукових праць. Фізикоматематичні науки. 2012. № 1. С. 43—50.

INFLUENCE OF LOADING ON THE TRANSFORMATION FUNCTION OF FLUX GATES UNDER UNIPOLAR PULSE EXCITATION

V. S. Bezkorovainyi, V. V. Yakovenko, Yu. V. Kreselyuk

Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, Luhansk People's Republic

The article proposes a technique for assessing the effect of active-capacitive load on the conversion function of flux gates under unipolar pulse excitation. The results of numerical calculations of the shape of the output signal of the flux-gates are given for different variations of the active-capacitive load.

Keywords: flux gate, unipolar pulse excitation, load, conversion function, pulse, oscillatory process, output signal.

Bibliography — 4 references.

Received April 1, 2021

УДК 001; 65.018:004.056

DOI: 10.52190/1729-6552_2021_2_34

КАЧЕСТВО АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ НИОКР ПО ЕЕ СОЗДАНИЮ

П. А. Монахов

РТУ МИРЭА, Москва, Россия

Представлен частный подход к постановке научных задач исследования, необходимых для функционирования систем поддержки принятия решения при управлении разработкой НИОКР. Приведены вербальная и формализованная постановки научной задачи исследования.

Ключевые слова: управление НИОКР, разработка НИОКР, создание автоматизированной системы, модели жизненных циклов автоматизированных систем, категории технических требований к созданию автоматизированных систем, постановка научной задачи.

Современный уровень технологического развития, проникновение новых информационных технологий в различные сферы человеческой деятельности обуславливают все более широкое их использование в процессе управления, т. е. принятия решений руководителями различных категорий и рангов.

Обладание оперативной и достоверной информацией определяет принятие руководителями различных категорий и рангов обоснованных и оперативных решений на всех уровнях управления. При этом вместо устаревших "ручных" технологий обработки информации повсеместно внедряют и используют автоматизированные системы (АС). Согласно ГОСТ 34.003-90 [1], "АС — это система, состоящая из персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, реализующая информационную технологию выполнения установленных функций". Стандарт выделяет несколько видов таких систем: системы автоматизированного проектирования, АС научных исследований, АС управления технологическими процессами, предприятиями и т. д. Основными элементами АС являются должностные лица и комплексы аппаратно-программных средств, автоматизирующие различные функции обслуживания информации [1].

Создание и внедрение таких систем является актуальной задачей обеспечения устойчивого повышения качества управления на предпряти-

ях, в организациях и государственных учреждениях Российской Федерации. Их создание для применения в органах государственного управления в соответствии с Федеральным законодательством осуществляется в форме научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). Разработка НИОКР является сложным системным процессом, подразумевающим обработку информации и принятие решений на основании полученных результатов.

Одним из важных направлений указанной деятельности является управление разработкой НИОКР по созданию АС (здесь и далее под созданием АС будем понимать создание АС для обеспечения функций государственного управления).

Задачу разработки НИОКР по созданию АС решают различные организации и государственные структуры. При этом информация о состоянии разработки должна оперативно доставляться и обрабатываться [2] в подразделении, выполняющем функции уполномоченного органа государственного заказчика, осуществляющего заказы на разработку НИОКР (далее — Заказчик), в том числе и при создании АС.

Под АС в общем случае будем понимать систему, состоящую из персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, реализующую информационную технологию выполнения функций сбора, накопления и хранения, отображения, преобразования, распределения и выдачи информации для последующего использования, в том числе для оперативного принятия управленческих решений [1].

С учетом роста объемов информации, а также сложности задач, решаемых при управлении разработкой НИОКР, постоянно требуется увеличение производительности информационной

Монахов Павел Алексеевич, сотрудник.
E-mail: pam-1986@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2021 г.

© Монахов П. А., 2021

работы Заказчика АС на основе использования современных методов обработки информации.

Оценка признаков состояния системы и среды (внешней обстановки) возлагается на лиц, принимающих решения (ЛПР) в рамках данных им полномочий по управлению хозяйственной деятельностью организации. Согласно [2] для реально функционирующих систем инвариантно по отношению к их уровням иерархии можно выделить ряд общих одновременно действующих и противоречащих друг другу факторов:

- резкий рост объема и сложности информации, потоки которой циркулируют в системах управления различного назначения;
- ужесточение требований к информационным процессам в системе управления;
- возрастающие требования к ограниченным возможностям человека, включенного в технологический цикл преобразования информации, по пропускной способности информации, состояния и обоснованности принимаемых решений.

С ростом динамики появления указанных признаков становится затруднительным своевременно и достоверно устанавливать факт появления признака, а также оперативно и обоснованно принимать решение по реакции (действию) системы для приближения ситуации (совокупного состояния системы и внешней среды [2]) к целевому состоянию управления. Это справедливо в том числе и для системы управления разработкой НИОКР по созданию АС.

Эффективное управление системой возможно в условиях достаточной информации о текущих и будущих состояниях внешней среды. Когда признаки складывающейся ситуации, во-первых, размыты в потоке входящей информации, во-вторых, искажены по ряду причин, в том числе человеческого фактора, некорректно полагать, что излишне поспешное управление без учета всех необходимых факторов внешней среды, с одной стороны, и слишком осторожное управление, хотя и достаточно обоснованное значительным объемом накопленной информации, но поэтому запоздалое, с другой стороны, могут привести к заданному исходными целями управления результату. Следовательно, необходимым условием приспособления системы управления к поведению внешней среды является своевременное и достоверное обнаружение признаков изменения состояния внешней среды.

В связи с этим совершенствование поддержки выработки решений ЛПР при управлении разработкой НИОКР необходимо для распознавания и оценки текущей ситуации на всех стадиях разработки, в том числе путем автоматизации обна-

ружения соответствующих признаков состояния системы и внешней среды.

Рост объемов и сложности обрабатываемой информации с использованием "ручной" технологии ее обработки обуславливает высокие трудозатраты при выработке управленческих решений. При этом выработанным таким образом решениям зачастую свойственна низкая обоснованность. Это предопределяет противоречие между качеством и полнотой преобразования информации для выработки должностным лицом решений по целенаправленному поведению управляемой системы и располагаемым для подготовки решения временем.

Решением указанной проблемы являются формулирование показателей оценки эффективности управления и разработка систем автоматизации поддержки принятия решений ЛПР.

Особенности разработки автоматизированных систем в интересах органов государственной власти

Согласно ГОСТ Р ИСО 12207-2010 [3] жизненный цикл (ЖЦ) определяется как развитие системы, продукта, услуги, проекта или других изготовленных человеком объектов, начиная со стадии разработки концепции и заканчивая прекращением применения. Под ЖЦ АС понимают ряд событий, происходящих с системой в процессе ее создания, использования и утилизации. Модель ЖЦ — это структура процессов и действий, связанных с ЖЦ, организуемых в стадии, которые также служат в качестве общей ссылки для установления связей и взаимопонимания сторон. Процесс создания АС можно представить в виде последовательного построения и преобразования ряда согласованных моделей на всех этапах ЖЦ. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 [3] выделяет такие модели жизненного цикла АС, как каскадная, пошаговой разработки, эволюционная, спиральная.

Каскадная модель предполагает последовательное выполнение этапов. При этом переход на следующий этап означает завершение работ предыдущего этапа. Эта модель не предполагает возвратов к предыдущим этапам разработки. Изменение требований в процессе разработки при каскадной модели ЖЦ является весьма трудоемкой и длительной процедурой.

Согласно данной модели [4] система разрабатывается с помощью ряда последовательных этапов (оперативный план, оперативные спецификации, программные спецификации, программирование, параметрическое тестирование,

сборочное тестирование, опытная эксплуатация, аттестация системы). Каскадная (водопадная [4]) модель является одной из наиболее популярных версий ступенчатой модели ЖЦ. Отметим, что в рамках каскадной модели, применяемой в ГОСТ 34.601-90 [5], обратные связи при разработке действуют только в рамках текущего этапа (параллельно выполняемым этапам). Последовательность стадий водопадной модели ЖЦ приведена на рис. 1.

Можно выделить следующие преимущества применения каскадной модели ЖЦ:

- распределение работ по этапам (стадиям), тщательная разработка и оформление проектной документации снижают трудоемкость разработки по сравнению с "ковбойским" стилем [4];
- выполняемые в логической последовательности этапы работ позволяют планировать сроки завершения всех работ и соответствующие затраты.

Основными недостатками этого подхода являются большой объем необходимых переделок

при утверждении ошибочных решений на ранних этапах разработки, а также низкий уровень гибкости при изменении требований в процессе разработки.

Другие перечисленные в [3] модели ЖЦ разработки АС (пошаговой, эволюционной и спиральной разработки) часто применяют при создании систем определенных видов, а также в случаях, когда требования к системе слабо формализованы. В этих моделях различными способами учитывается необходимость повторного выполнения всех или некоторых работ стадий.

Для крупных проектов способ повременной оплаты с определением итоговой стоимости по результатам работ (пошаговая, эволюционная, спиральная модели ЖЦ) в большинстве случаев трудноприменим. Поскольку создание крупных АС в интересах органов государственного управления требует существенных финансовых затрат, используют контракты с фиксированной ценой и, следовательно, каскадную модель ЖЦ АС.

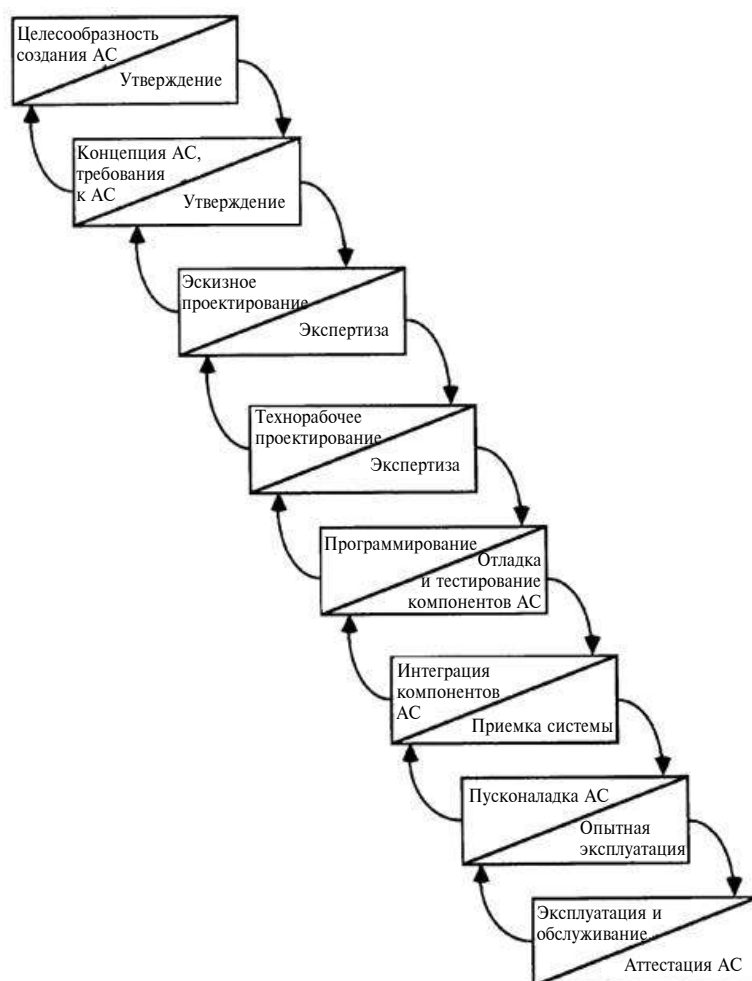


Рис. 1. Последовательность работ при водопадной модели жизненного цикла [4] (в контексте ГОСТ 34.601-90)

Категории технических требований к создаваемым в рамках НИОКР автоматизированным системам

Существуют различные подходы к формированию требований при разработке НИОКР. Например, ГОСТ РВ 15.203-2001 выделяет требования к составу и назначению, ГОСТ 34.602-89 приводит конкретные виды требований и указания по их содержанию. В общем случае можно выделить три категории требований к разработке АС: функциональные, эксплуатационные, технические.

Разработка функциональных требований производится по результатам анализа предметной области объекта автоматизации, определения свойств рассматриваемой организационной системы и построения соответствующей этим свойствам функциональной структуры. Функциональные требования описывают основные функции разрабатываемой системы, которые должны соответствовать свойствам системы. Функциональные требования определяют перечень автоматизируемых функций, их входы, выходы и ограничения.

Технические требования описывают условия реализации функционала с учетом актуального уровня развития техники, современных технических средств и технологий. К ним относятся требования к инструментам и средам разработки программного обеспечения, требования к аппаратной архитектуре, операционным средам исполнения программ, телекоммуникационным технологиям, тактико-техническим характеристикам входящих в состав системы комплексов технических средств и т. д.

Эксплуатационные требования задают характеристики автоматизируемых функций и внедряемых комплексов технических средств при использовании проектируемой системы человеком. К ним относятся требования к объемно-временным характеристикам обработки запросов информационным процессором, к интерфейсам взаимодействия, эргономике, устойчивости, надежности, хранению, транспортировке и т. д.

Создание АС для обеспечения функций органов государственной власти является сложной задачей. Ее решение обычно требует декомпозиции процедуры создания АС. Одним из ее способов является:

- представление сложной АС в виде структуры ее подсистем;
- декомпозиция задач по созданию АС путем их отображения на каждую из подсистем и их последующей верификации.

При этом можно выделить следующие уровни декомпозиции системы: АС в целом, составные

части (СЧ) АС, основные элементы СЧ АС, комплектующие АС.

Составные части автоматизированной системы определяются как подсистемы, составляющие АС в целом. К ним относятся в том числе комплексы технических средств системы, программное обеспечение системы, эксплуатационная документация на систему, структурированная кабельная система и телекоммуникационное оборудование, подсистема защиты информации и т. д. К основным элементам составных частей АС относятся типы серверов и АРМ, виды и состав программного обеспечения, формуляры, руководства пользователя и администратора системы, тип линий связи, устройств и способов коммутации и т. д. Комплектующие определяют виды и содержание документов, конкретные версии дистрибутивов программных средств, а также конкретные модели и виды изделий и оборудования. При этом требования к системе предъявляются на всех уровнях декомпозиции.

Проблема формулирования системы показателей

Все кибернетические и эргатические системы традиционно относят к классу сложных систем [2]. Под эргатической системой понимают систему: человек, усилитель его рецепторов, усилитель его эффекторов и его мышления. Важным свойством таких систем является целенаправленность их функционирования.

В общем случае под сложными системами принято понимать системы, поведение которых обязательно включает акты решения, т. е. выбор из возможных альтернативных вариантов. Система управления разработкой НИОКР относится к классу сложных систем, поскольку продуктом управления является принятие решения.

Формализация целей функционирования информационно-управляющих систем в виде системы показателей связана с:

- определением всех свойств рассматриваемой системы, которые влияют на достижение целей;
- введением количественной меры свойств системы (показателей качества), обуславливающих достижение целей;
- выбором процедур редукции, нормализации и скаляризации (свертки) вектора показателей качества и получением обобщенного показателя функционирования рассматриваемой системы либо показателя эффективности функционирования.

Процедура исходного формулирования показателей функционирования рассматриваемой системы является исключительно важной, по-

сколько никакие удобства промежуточных рассуждений и вычислений не способны оправдать неадекватность исходных формулировок.

Несмотря на значительные достижения современной науки в области искусственного интеллекта, формулирование систем показателей сложных информационно-управляющих систем по-прежнему является предметом умственного труда человека. При этом процесс формулирования системы показателей обладает определенными закономерностями, что показано в научных трудах Е. С. Вентцеля [6], В. В. Дружинина [7], В. П. Морозова [8] и других. Среди научных основ формулирования систем показателей находятся основные требования к системам показателей (адекватность целям системы, минимальная размерность, представимость в аналитической форме и применение эффективных методов исследования). В [6–8] приведены основные рекомендации по выполнению этих требований.

Показатели эффективности (результативности) управления разработкой НИОКР по созданию автоматизированной системы

Система разработки НИОКР как сложная система состоит из ряда более мелких подсистем, реализующих различные аспекты функции создания продукции. В частности, такими подсистемами являются системы управления государственного заказчика, Заказчика, генерального заказчика, головного исполнителя, исполнителя и других организаций, участвующих и взаимодействующих в процессе разработки НИОКР. Подсистема управления Заказчика должна обеспечивать функции устойчивости, непрерывности, скрытности принятия и реализации управленческих решений на основе всесторонней и достоверной информации.

Качество (результативность) организационно-управленческой деятельности органа государственного управления обычно характеризуется показателем, представляемым в виде некоторой свертки параметров состояния управления и позволяющим оценить процесс управления и его качество.

В рассматриваемом случае основными показателями являются показатели оперативности, достоверности и непрерывности управления разработкой НИОКР, представленные через величины, требуемые значения которых находятся в пределах от 0 до 1 (0 — худшее значение, 1 — лучшее). Дополнительно можно рассматривать показатели своевременности, гибкости и надежности управления.

Следовательно, качество (результативность) управления разработкой НИОКР может быть представлено выражением

$$K_{\text{упр. НИОКР}} = P_{\text{оп}} \times P_{\text{дос}} \times P_{\text{неп}} \times K_{\text{зат}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{оп}}$ — показатель оперативности управления;

$P_{\text{дос}}$ — показатель достоверности управления;

$P_{\text{неп}}$ — показатель непрерывности управления;

$K_{\text{зат}}$ — коэффициент затрат на разработку НИОКР.

Для оценки коэффициента затрат предложено следующее выражение:

$$K_{\text{зат}} = e^{-(Z_{\text{пред}}/Z_{\text{доп}})}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{пред}}$ — величина предлагаемых затрат на разработку НИОКР;

$Z_{\text{доп}}$ — величина допустимых (минимально требуемых) затрат на разработку НИОКР.

Экспоненциальная функция взята в связи с тем, что ее свойства обеспечивают простоту вычислений и наглядность.

В соответствии с ГОСТ 34.003-90 [1] эффективность АС характеризуется степенью достижения целей, поставленных при ее создании. Стандарт предполагает различные виды эффективности АС, которые выходят за его рамки. Показатель эффективности определяется как мера или характеристика для оценки эффективности АС.

Результат проведенных НИОКР по созданию АС может обеспечить заданный уровень ожидания от разработки, но только при достижении необходимого уровня качества созданной АС. К показателям, характеризующим качество разработанной АС, можно отнести ее функциональную полноту, удобство использования и администрирования, высокие тактико-технические характеристики, долю отечественных готовых основных элементов в составе АС, ремонтпригодность и простоту обслуживания входящих КТС, низкую стоимость владения системой в течение ее жизненного цикла, полноту и качество документации, готовность к модернизации. Ряд из перечисленных требований в полном объеме относится к АС, разрабатываемым для органов государственного управления.

Под комплексным показателем качества разработки НИОКР при создании АС будем понимать совокупность свойств разработанной АС, характеризующих ее соответствие целям приме-

нения и способность поддерживать в процессе эксплуатации заданные тактико-технические характеристики с учетом заданных условий эксплуатации.

Таким образом, основными составляющими качества разработанной АС являются функциональная полнота, эксплуатационные характеристики, тактико-технические характеристики.

Перечень основных составляющих качества разработанной АС приведен на рис. 2.



Рис. 2. Основные составляющие качества АС при ее создании в рамках НИОКР

Оценка качества управления разработкой НИОКР по созданию АС может быть произведена через соответствующие показатели качества полученной АС. Следовательно, эффективность управления разработкой НИОКР можно определить, сравнивая количественные величины показателей качества разработанной АС.

В качестве показателя предложено использовать соответствующий коэффициент:

$$K_{\text{кач}} = K_{\text{фун}} K_{\text{экс}} K_{\text{ТТХ}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{фун}}$ — коэффициент функциональной полноты;

$K_{\text{экс}}$ — коэффициент соответствия эксплуатационных характеристик;

$K_{\text{ТТХ}}$ — коэффициент реализации заданных ТТХ.

Величины коэффициентов находятся в пределах от 0 до 1. Они зависят от того, насколько учтены требования к системе в целом, требования к функциям (задачам) и видам обеспечения, т. е. их полнота учета.

Определим коэффициент для существующих АС и для предлагаемого (перспективного) варианта. Для существующих АС

$$K_{\text{фун}} = 1 - e^{-\left(\frac{S_{\text{фун. тек}}}{S_{\text{фун. треб}}}\right)}, \quad (4)$$

$$K_{\text{экс}} = 1 - e^{-\left(\frac{S_{\text{экс. тек}}}{S_{\text{экс. треб}}}\right)}, \quad (5)$$

$$K_{\text{ТТХ}} = 1 - e^{-\left(\frac{S_{\text{ТТХ тек}}}{S_{\text{ТТХ треб}}}\right)}. \quad (6)$$

Для разрабатываемых АС

$$K_{\text{фун}} = 1 - e^{-\left(\frac{S_{\text{фун. пред}}}{S_{\text{фун. треб}}}\right)}, \quad (7)$$

$$K_{\text{экс}} = 1 - e^{-\left(\frac{S_{\text{экс. пред}}}{S_{\text{экс. треб}}}\right)}, \quad (8)$$

$$K_{\text{ТТХ}} = 1 - e^{-\left(\frac{S_{\text{ТТХ пред}}}{S_{\text{ТТХ треб}}}\right)}, \quad (9)$$

где $S_{\text{треб}}$ — требуемая величина полноты учета требований, предъявляемых к разрабатываемой системе;

$S_{\text{тек}}$ — текущая величина полноты учета требований, предъявляемых к разрабатываемой системе;

$S_{\text{пред}}$ — предлагаемая величина полноты учета требований, предъявляемых к разрабатываемой системе.

Требуемая величина для расчетов принимается из утвержденного ТЗ (ТТЗ) на разработку НИОКР по созданию АС. В количественном аспекте она определяется числом предъявленных к АС требований соответствующей категории. В качественном аспекте она определяется на соответствующих этапах экспертизы.

Таким образом, введенные показатели позволяют определить качество организационно-управленческой деятельности Заказчика при разработке НИОКР по созданию АС, через количественные показатели ее эффективности (качества).

Научная задача обеспечения поддержки принятия решений должностным лицом при управлении разработкой НИОКР по созданию АС

Цель исследования заключается в том, чтобы на основе анализа имеющейся нормативной правовой базы, существующих взглядов и положений теории управления разработать и обосновать теоретические положения и практические рекомендации по поддержке принятия решений

должностным лицом при управлении разработкой НИОКР по созданию АС для повышения качества создаваемой системы.

Существующее методическое обеспечение управления разработкой НИОКР по созданию АС не позволяет в полной мере учесть как всю полноту требований (функциональных, эксплуатационных, тактико-технических), оказывающих влияние на качество создаваемой системы в интересах конкретного государственного заказчика, так и вес отдельных видов требований, т. е. их ранжирование по значимости для последующей эксплуатации созданной системы.

Соответственно и применяемые организационные и правовые меры по оценке реализации видов требований нуждаются в уточнении и доработке. Таким образом, может быть поставлена научная задача исследований, заключающаяся в том, чтобы на основе исследований современных методологий управления разработкой НИОКР по созданию АС, а также существующих методологий и методик поддержки принятия решений органа управления разработать методики и обосновать организационно-технические предложения по формированию и последующей оценке качества реализации технических требований к разрабатываемым в рамках НИОКР АС, которые обеспечат повышение качества разрабатываемых АС в заданных исходных условиях за счет достижения требуемой эффективности управления разработкой НИОКР Заказчиком. Предполагается, что достижение данной цели возможно за счет разработки усовершенствованных алгоритмов поддержки принятия решений должностным лицом при управлении разработкой НИОКР по созданию АС и реализации их в автоматизированной системе поддержки принятия решений (СППР).

Выполнение научной задачи исследования должно обеспечить:

- соответствие между задачами органа управления (ОУ) и функциями СППР, т. е. функционирование СППР должно соответствовать предназначению органа управления и обеспечивать выполнение задач, возложенных на него:

$$Z_{\text{ОУ}} \rightarrow \Phi_{\text{СППР}},$$

где $Z_{\text{ОУ}}$ — множество задач, решаемых ОУ в соответствии с его предназначением;

$\Phi_{\text{СППР}}$ — множество функций СППР, обеспечивающих решение множества задач органа управления.

- качество (результативность) управления с использованием СППР ОУ:

$$K_{\text{уп. СППР}} \rightarrow \max;$$

- повышение показателя обоснованности управления разработкой НИОКР по созданию АС как одного из требований к управлению:

$$P_{\text{об}} \rightarrow 1;$$

- повышение показателя (коэффициента) качества разработанной АС:

$$K_{\text{кач}} \rightarrow 1;$$

- формирование полноты предъявляемых требований (функциональных, эксплуатационных, тактико-технических), оказывающих влияние на качество создаваемой АС:

$$S_{\text{пред}} \rightarrow \max.$$

При этом $S_{\text{пред}}$ должна быть максимизирована так, чтобы

$$e^{\left(\frac{S_{\text{фун. пред}}}{S_{\text{фун. треб}}}\right)} \rightarrow 0; \quad e^{\left(\frac{S_{\text{экс. пред}}}{S_{\text{экс. треб}}}\right)} \rightarrow 0;$$

$$e^{\left(\frac{S_{\text{ТТХ пред}}}{S_{\text{ТТХ треб}}}\right)} \rightarrow 0.$$

Разработка методик по учету всех видов требований (угроз, уязвимостей, рисков), оказывающих влияние на качество разработки АС, должна осуществляться в рамках Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017—2030 годы (утверждена указом Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203), Национальных целей и стратегических задач развития Российской Федерации на период до 2024 года (утверждены указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204), а также распоряжения Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 № 1632р, утверждающего программу "Цифровая экономика Российской Федерации".

Таким образом, постановка научной задачи исследования в приведенном варианте обуславливает необходимость разработки методик, обоснования организационно-технических предложений по формированию требований к создаваемой АС и оценки степени их реализации на всех этапах ЖЦ АС, обеспечивающих повышение уровня результативности разработанных в НИОКР АС в контексте соответствия ожиданиям Заказчика, для достижения требуемой результативности организационно-управленческой деятельности Заказчика.

Разработка перечисленных методик и предложений должна позволить решить научную задачу исследования и достичь обусловленной физической цели.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 34.003-90 Информационная технология (ИТ). Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения.
2. Тараскин М. М., Коваленко А. П., Коваленко Ю. И., Москвитин Г. И. Проблемы поддержки выработки решения при распознавании ситуаций в автоматизированных информационных системах. — М.: Русайнс, 2017. — 113 с.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 Информационная технология (ИТ). Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств.
4. Boehm B. A Spiral Model of Software Development and Enhancement // IEEE Computer. 1988. № 21(5). P. 61—72. DOI: 10.1109/2.59. S2CID 1781829
5. ГОСТ 34.601-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Изд. 2, перераб. и дополн. — М.: Физматлит, 1962. — 564 с.
7. Дружинин В. В., Конторов Д. С. Системотехника. — М.: Радио и связь, 1985. — 200 с.
8. Морозов В. П., Дымарский Я. С. Элементы теории управления ГАП: математическое обеспечение. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1984. — 333 с.

THE QUALITY OF AN AUTOMATED SYSTEM AS AN INDICATOR OF THE EFFECTIVENESS OF R&D DEVELOPMENT MANAGEMENT FOR ITS CREATION

P. A. Monakhov

RTU MIREA, Moscow, Russia

A particular approach to the formulation of scientific research tasks necessary for the functioning of decision support systems in the development of R&D development is presented. The verbal and formalized formulation of the task of scientific research is presented.

Keywords: R&D management, R&D development, creation of an automated system, life cycle models of automated systems, categories of technical requirements for the creation of automated systems, formulation of a scientific problem.

Bibliography — 8 references.

Received April 12, 2021

УДК 621.311.243

DOI: 10.52190/1729-6552_2021_2_42

ФИЗИЧЕСКИЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

Е. Ю. Лушпа, канд. техн. наук

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

Исследуется конструкция поглотителя, в которой используется массив пирамидальных наноструктур, изготовленных из натурального гиперболического метаматериала — теллурида висмута (Bi_2Te_3) на серебряной подложке. Численное исследование проводится для изучения поглощения солнечного излучения и определения подходящих диапазонов геометрических параметров предлагаемой конструкции, погруженной в жидкостную среду — воду. Высокая степень поглощения может быть достигнута даже при некоторых изменениях этих параметров. Данное исследование поможет обосновать теоретическую базу для эффективного сбора солнечной энергии в процессе фототермического преобразования, что особенно актуально для промышленных технологий в машиностроении.

Ключевые слова: теллурид висмута, широкополосное поглощение, гиперболический метаматериал, идеальный поглотитель, фототермическое преобразование.

Возможность сбора солнечной энергии в целях обеспечения в достаточном количестве чистой и возобновляемой энергии, что особенно важно для современной концепции *экологически чистой* энергии вызывает большой интерес. Солнечная энергия может использоваться в качестве источника энергии для фотоэлектрических процессов. Например, изобретена солнечная батарея для выработки электроэнергии (фотохимический процесс, фотокатализ и фототермический процесс). Одной из наиболее серьезных проблем в этих отраслях является низкая эффективность сбора солнечной энергии, что особенно важно для фототермического преобразования [1].

Поглотители с высокой фототермической эффективностью широко изучались в плане применения в различных областях. Однако большинство таких поглотителей демонстрирует сильное поглощение только в узкой полосе. Недавно были предложены широкополосные совершенные поглотители, созданные путем объединения нескольких резонаторов совместно с использованием материалов с фазовым переходом или нанопроволок. Подавление отражения массивами нанопроволок может значительно

увеличить оптическое поглощение. Благодаря антиотражающему эффекту наноконусы могут расширять спектр поглощения по сравнению с нанопроволокой, поскольку постепенное увеличение площади поперечного сечения позволяет получить индекс градиента от падающей среды к материалу.

Предложен подход к фототермической конверсии с высокой эффективностью. Пар может образовываться в результате такого процесса только с помощью инсоляции. При этом коэффициент поглощения солнечного излучения составляет около 93 %, что намного ниже, чем у вертикально ориентированных массивов углеродных нанотрубок (может достигать более 99 %) [2]. Впоследствии изготовлены самоорганизующиеся наночастицы золота на трехмерном шаблоне из пористого оксида алюминия для достижения эффекта широкополосного поглотителя благодаря преимуществу гибридизации локализованных поверхностных плазмонов и безызлучательного распада плазмона. Из-за высокого коэффициента поглощения (около 99 %) солнечной энергии в плазмонной структуре и локализованного нагрева их структуры они обладают высокой эффективностью преобразования и скоростью испарения при повышенной интенсивности освещения [2].

Другой способ реализовать идеальный широкополосный поглотитель — использовать гиперболические метаматериалы. Это метаматериалы с совершенно разными диэлектрическими функциями (металлическая и диэлектрическая среды), действующими в двух ортогональных

Лушпа Евгений Юрьевич, доцент, доцент кафедры "РВСН ВУЦ".

E-mail: euglushpa@list.ru

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2021 г.

© Лушпа Е. Ю., 2021

направлениях, которые обладают анизотропными оптическими свойствами [3]. Если коническая наноструктура выполнена из такого материала, групповая скорость волноводной моды уменьшается по мере увеличения поперечного сечения структуры. Следовательно, групповая скорость может оказаться равной нулю в определенном месте и отрицательной в больших поперечных сечениях [3].

Электромагнитные волны локализованы в области, где общая скорость волн равна нулю. Следовательно, они могут полностью поглощаться. Это явление называется эффектом медленного света. Оно позволяет улавливать широкополосный свет за счет постепенного изменения ширины конструкции.

Коротковолновый свет улавливается на малой ширине (рядом с падающей средой), тогда как длинноволновый свет поглощается на большой ширине, что приводит к почти полному поглощению падающей энергии в более широком спектральном диапазоне. В отличие от поверхностного плазменного резонанса, который возникает вблизи поверхности металлических наноструктур или наночастиц, резонанс для гиперболических метаматериалов имеет место внутри наноструктур. Искусственно сконструированные многослойные метаматериалы демонстрируют гиперболический отклик с широкополосным поглощением света, когда наноструктура имеет специально разработанные формы. Продемонстрировано идеальное поглощение в средней инфракрасной области некоторыми естественными гиперболическими материалами. Большинство изготовленных или встречающихся в природе гиперболических материалов соответствует диапазону средних инфракрасных или терагерцевых частот. Некоторые материалы мо-

гут проявлять естественное гиперболическое поведение в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Однако их применение для увеличения поглощения солнечной энергии еще не исследовано.

В исследовании предлагается структура поглощения света, в которой применен массив пирамидальных наноструктур из Bi_2Te_3 (природного гиперболического метаматериала) на тонкой подложке для поглощения падающего солнечного излучения. Эта структура рассчитывается численно путем изменения геометрических параметров наноструктуры, а также метаматериала и толщины подложки для достижения очень высокого коэффициента поглощения в спектральной области солнечного излучения. Механизмы, участвующие в широкополосном поглощении в предлагаемой конструкции, выявляются с помощью распределения плотности рассеиваемой мощности. Поглотитель, погруженный в жидкостную среду (воду), может использоваться в качестве источника тепла для генерации пара под солнечным светом [4].

Оптические свойства Bi_2Te_3 и механизмы идеального поглощения

Предлагаемая структура поглотителя состоит из двумерного массива (с периодом Λ) пирамидальных наноструктур из Bi_2Te_3 на вершине подложки, как это показано на рис. 1.

Геометрия пирамиды определяется шириной w_1 наверху, шириной w_2 внизу и высотой H . Толщина подложки обозначена через h . Наноструктура изготовлена из Bi_2Te_3 , который проявляет оптическую анизотропию и является естественным гиперболическим материалом

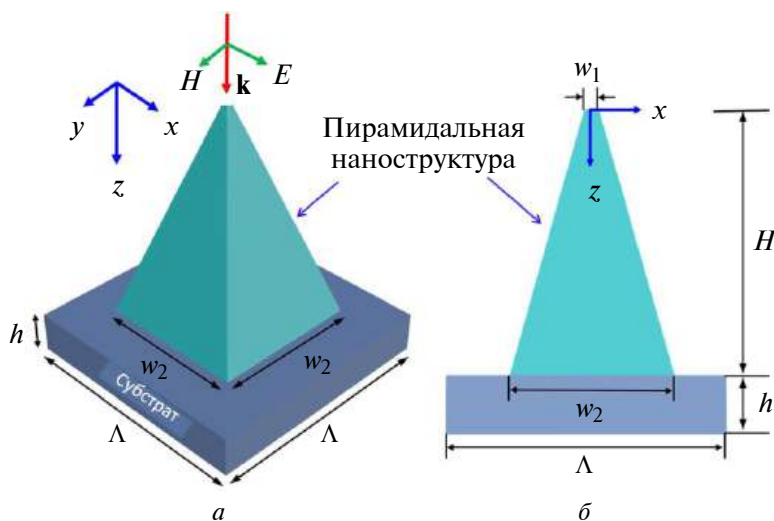


Рис. 1. Схема элементарной ячейки структуры с пирамидами Bi_2Te_3 на тонкой пленке (подложке):

a — 3D-изображение; b — вид сбоку.

Направление падающего света обозначено волновым вектором \mathbf{k} , который параллелен вертикальной оси пирамиды, или направлению z . Указаны другие геометрические параметры, электрическое и магнитное поля.

Конструкция погружена в воду (падающая среда)

с диапазоном от ультрафиолета до ближнего инфракрасного вплоть до длины волны $\lambda \approx 1000$ нм (λ — длина волны в вакууме) [4]. Свет падает в положительном направлении z , параллельном оси пирамид. Далее обсудим оптические свойства материала и наноструктуры с упором на объяснение двух ключевых механизмов, которые приводят к идеальному поглощению: эффекта медленного света и эффекта градиентного индекса конусных наноструктур.

Эффект медленного света

Диэлектрическая функция одноосной среды, оптическая ось которой параллельна направлению z , может быть выражена как

$$\epsilon' = \begin{pmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix}.$$

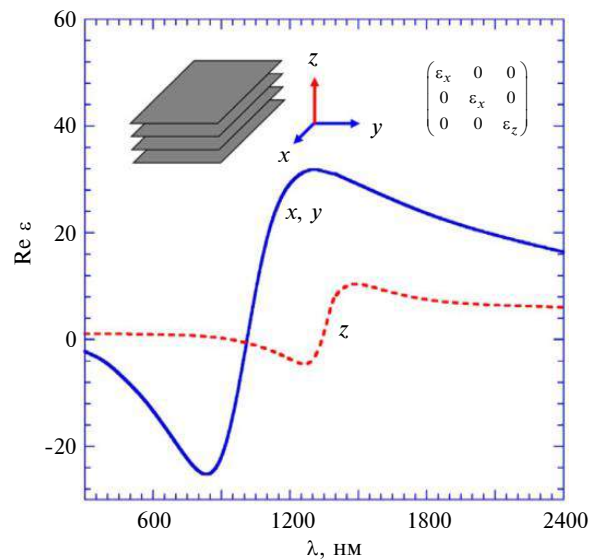
Диэлектрическая проницаемость одинакова в направлениях x и y (ϵ_x), но отличается в направлении z (ϵ_z). Подчеркнем, что ϵ_z соответствует электрическому полю, параллельному оптической оси, как это показано на вставке к рис. 2, а. Для заданного направления диэлектрическая функция является комплексной:

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' = (n + ik)^2,$$

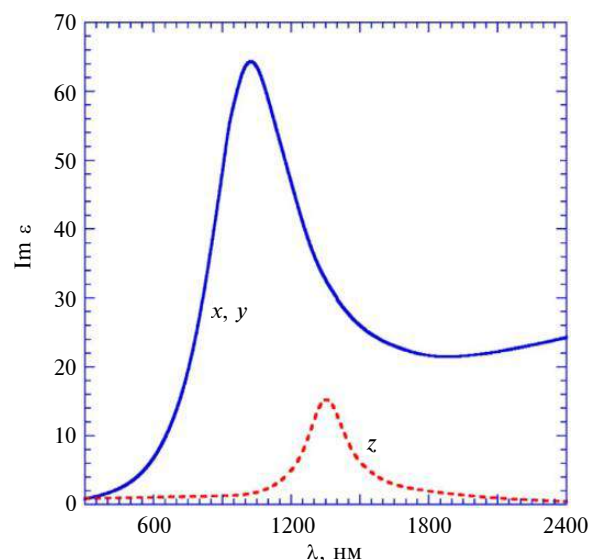
где n и k — показатель преломления и коэффициент затухания соответственно (индексы "x" и "z" для простоты записи здесь опущены). Действительная и мнимая части диэлектрических функций Bi_2Te_3 в направлениях как x , так и z приведены на рис. 2, а и б соответственно.

Падающие электромагнитные волны в солнечном спектре ($300 \text{ нм} \leq \lambda \leq 2400 \text{ нм}$) можно разделить на две области в соответствии с характеристикой диэлектрической функции Bi_2Te_3 .

Как видно из рис. 2, а, Bi_2Te_3 проявляет металлические свойства в направлении x (или y) (т. е. $\epsilon_x' < 0$) и диэлектрические свойства в направлении z (т. е. $\epsilon_z' > 0$) на длинах волн от 300 до примерно 1000 нм, что является гиперболической областью типа II. В этой области изочастотный контур имеет гиперболическую форму. Гиперболичность II типа является необходимым условием эффекта медленного света. Другая область — это длинноволновая область от примерно 1000 до 2400 нм, которая находится за пределами гиперболической полосы Bi_2Te_3 .



а



б

Рис. 2. Действительная (а) и мнимая (б) части диэлектрической функции и комплексный показатель преломления для различных компонентов Bi_2Te_3 . На вставке показаны кристаллическая структура и диэлектрический тензор

Эффективный индекс градиента

Предлагаемый поглотитель, содержащий периодические наноструктуры на подложке, погружен в воду. В совокупности наноструктура и водная среда представляют собой неоднородную среду, которую можно рассматривать как стратифицированную эффективную однородную среду.

Для электрического поля в плоскости xu эффективная диэлектрическая функция каждого слоя может быть выражена следующим образом:

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{ef}}} = \frac{f}{\varepsilon_{\text{Bi}_2\text{Te}_3}} + \frac{1-f}{\varepsilon_{\text{wat}}},$$

где $\varepsilon_{\text{Bi}_2\text{Te}_3}$ и ε_{wat} — диэлектрические функции Bi_2Te_3 и воды соответственно;

f — коэффициент заполнения объема наноструктур в каждом поперечном сечении, который можно рассматривать как отношение поперечного сечения наноструктуры и площади периодической области.

В случае рассматриваемых двумерных пирамидальных наноструктур поляризация волны не влияет на коэффициент поглощения или предположение об эффективной среде из-за симметрии. Отсюда следует, что значение f увеличивается от вершины к основанию пирамидальной наноструктуры. Эффективный показатель преломления n_{ef} и коэффициенты экстинкции ik_{ef} в направлении x или y можно вычислить из эффективной диэлектрической функции ε_{ef} по формуле

$$\varepsilon_{\text{ef}} = (n_{\text{ef}} + ik_{\text{ef}})^2.$$

Эффективный показатель преломления n_{ef} предложенного поглотителя постепенно увеличивается в положительном направлении z от 1,33 для воды до большего значения, соответствующего Bi_2Te_3 . Важной особенностью эффекта градиента индекса является подавление отражения, когда индекс совпадает с индексом падающей среды [4].

Отражение света на любой границе раздела зависит от контраста показателей преломления и становится меньше при меньшем контрасте. Другое подтверждение влияния среды с градиентным показателем преломления состоит в том, что свет при наклонном падении изгибается непрерывно, а не резко на границе раздела двух сред с разными показателями преломления [5].

Причина выбора пирамидальной наноструктуры заключается в том, что эта фигура создает профиль эффективного показателя, который постепенно увеличивается от вершины к основанию структуры. Следует отметить, что теория эффективной среды справедлива только тогда, когда длина волны намного больше периода решетки. Этот критерий не может выполняться для всех рассмотренных случаев. Таким образом,

были использованы строгие численные решения для взаимодействия электромагнитных волн с наноструктурами для точного расчета спектров поглощения, а также распределения поля и диссипации. Концепция градиентного индекса обеспечивает определенное качественное понимание лежащих в основе рассматриваемых процессов физических механизмов [6].

Широкополосный идеальный поглотитель солнечного излучения

Поглощающая способность предлагаемого поглотителя с наноструктурой из Bi_2Te_3 рассчитана в широком диапазоне длин волн для сбора солнечной энергии. Спектр конструкции для структуры поглотителя по умолчанию показан на рис. 3. Видно, что коэффициент поглощения практически равен 1 во всем солнечном спектре, а его минимум по шкале ординат составляет 0,9988.

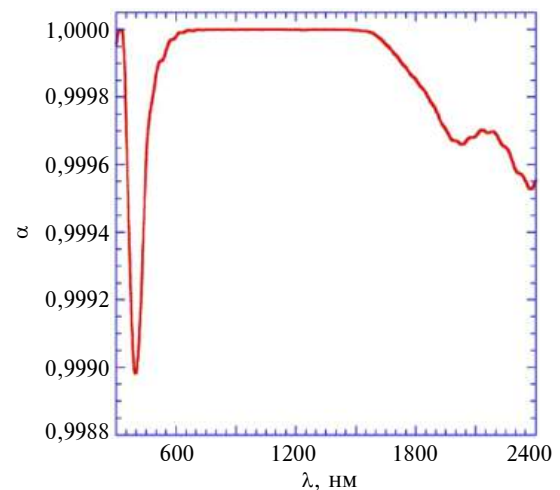


Рис. 3. Коэффициент поглощения α предложенной конструкции с использованием пирамидальных наноструктур Bi_2Te_3 с периодом $\Lambda = 200$ нм на слое Ag с $h = 100$ нм (геометрия пирамиды: $H = 3000$ нм; $w_1 = 4$ нм; $w_2 = 200$ нм)

Несмотря на то что в спектре около 400 нм наблюдается провал, самое низкое значение близко к 99,9 %. Очевидно, что данный поглотитель может почти полностью поглощать падающее солнечное излучение в широком спектре (от 300 до 2400 нм) [7].

Для предлагаемой наноструктуры поперечные сечения постепенно увеличиваются в направлении z . Такая конструкция позволяет эффекту медленного света в гиперболической области типа II улавливать свет с разными длинами волн вокруг разных мест пирамидальной наноструктуры.

Эффект проиллюстрирован путем вычисления распределения плотности рассеиваемой мощности, как это показано контурными графиками на рис. 4, на шести различных длинах волн.

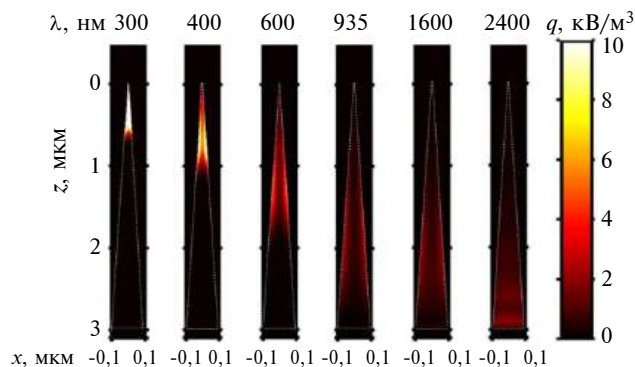


Рис. 4. Распределение плотности рассеиваемой мощности на шести различных длинах волн с учетом того, что гиперболическая полоса Bi_2Te_3 охватывает длины волн < 1000 нм (пирамидальные наноструктуры обведены белыми пунктирными линиями)

Расчет основан на методе строгого анализа связанных волн (САСВ) трапециевидной решетчатой структуры, имеющей ту же ширину, что и пирамидальные наноструктуры. В расчетах электрическое поле падающей волны направлено вдоль оси x , а его величина установлена на 1 В/м при сравнении четырех коротких длин волн ($\lambda = 300, 400, 600$ и 935 нм).

В гиперболической области II типа падающий свет на разных длинах волн улавливается в разных частях наноструктуры. Свет с самой короткой длиной волны ($\lambda = 300$ нм) задерживается около вершины пирамиды (с более ярким цветом). По мере увеличения длины волны самая большая плотность рассеиваемой мощности смещается вниз примерно к середине пирамиды (с шириной поперечного сечения около 100 нм) при $\lambda = 935$ нм. Следует отметить, что поглощение происходит на относительно большой глубине в направлении z от примерно 0,6 мкм при $\lambda = 300$ нм до более 2,0 мкм при $\lambda = 935$ нм [7].

Согласование индексов или согласование импеданса на границе раздела между падающей средой и вершиной наноструктуры может подавить отражение, а также способствовать идеальному поглощению в гиперболической области. На длине волны более 1000 нм отсутствует эффект медленного света, и механизм поглощения в основном обусловлен эффектом градиентного индекса, связанным с эффектом подложки (см. далее).

Для предложенной структуры эффект индекса градиента подавляет отражение, так что отражательная способность всей структуры становится

почти нулевой. Пирамидальные наноструктуры с высоким соотношением сторон обеспечивают эффективный, гладкий и ступенчатый показатель от воды до Bi_2Te_3 , когда поперечное сечение наноструктуры увеличивается с 4 до 200 нм в положительном направлении z . Более того, эффект согласования индексов подавления отражения практически не зависит от длины волны. Коэффициент экстинкции Bi_2Te_3 , особенно для направления x , имеет пик около $\lambda \approx 900$ нм со значением выше 6. На более длинных волнах коэффициент экстинкции остается выше 2 [8].

Если подложка является сильно отражающей и достаточно толстой, то пропусканием всей структуры можно пренебречь. Тогда большая часть падающего излучения все еще может поглощаться наноструктурами. Комбинация двух упомянутых механизмов приводит к почти 100-процентному широкополосному поглощению падающего света в более длинноволновой области [8]. Эффект антиотражения можно проиллюстрировать распределением плотности рассеиваемой мощности на $\lambda = 1600$ и 2400 нм, как это показано на рис. 4. Поглощенная энергия в основном задерживается в нижней половине наноструктур.

Низкий уровень плотности рассеиваемой мощности вблизи верхней части обусловлен относительно большой глубиной проникновения, которую можно рассчитать на основе эффективных коэффициентов ослабления, поскольку верхние области имеют меньшую заполняющую долю. Эффективный показатель преломления постепенно увеличивается, но и эффективный коэффициент экстинкции также увеличивается с увеличением площади поперечного сечения пирамиды. Подложка из серебра отражает большую часть электромагнитной энергии обратно в наноструктуру, поглощая оставшуюся. Следует отметить, что геометрические параметры играют важную роль в работе предлагаемой конструкции [9].

Результаты

Метод конечной разницы во временной области используют для вычисления параметров спектрального отражения (R) и пропускания (T) предложенной структуры на основе уравнений Максвелла. Коэффициент поглощения получают по формуле $A = 1 - R - T$.

Для демонстрации и сравнения выбрана типовая конструкция поглотителя со следующими геометрическими параметрами: $w_1 = 4$ нм; $w_2 = 200$ нм; $H = 3000$ нм; $\Lambda = 200$ нм. Материал подложки — серебро толщиной $h = 100$ нм.

В дальнейшем эти параметры используют как значения по умолчанию.

Расчеты выполняют, чтобы найти подходящие диапазоны параметров для предлагаемой конструкции с высоким коэффициентом поглощения для сбора солнечной энергии. Эти переменные включают высоту, верхнюю и нижнюю ширину пирамидальной наноструктуры (H , w_1 , w_2), расстояние между двумя соседними пирамидами, или период Λ , материал и высоту h подложки.

Диэлектрические функции всех материалов подложек за исключением золота взяты из данных. Предполагается, что окружающей средой является вода с показателем n_{ef} равным 1,33 во всей интересующей области спектра. Отражение на границе раздела воздух/вода не учитывается.

Для расчета локальной плотности рассеиваемой мощности используют метод строгого анализа связанных волн (САСВ). Для расчета САСВ структуру предполагают одномерной в плоскости x y , так что период находят только в направлении x . Падающая плоская волна поляризована так, что ее магнитное поле направлено в направлении y (поперечная магнитная волна) [10].

Заключение

Предложена конструкция поглотителя для широкополосного солнечного спектра с использованием массива пирамидальных наноструктур из Bi_2Te_3 (природного гиперболического метаматериала), помещенных на верхнюю часть подложки. Геометрические параметры предложенного поглотителя исследованы численно с учетом изменения параметров пирамиды, расстояния между наноструктурами, а также толщины подложки и материала. Предлагаемая

структура обеспечивает идеальное широкополосное поглощение за счет сочетания *эффекта медленного света* и *эффекта подавления отражения с градиентным индексом* в гиперболической области II типа.

Полученные результаты показывают, что предложенная структура может достигать значений коэффициента поглощения более 99,9 % в диапазоне длин волн 300–2400 нм, что покрывает большую часть спектра солнечного излучения. Основные механизмы объясняются комбинацией эффекта медленного света и эффекта градиентного индекса. На оптические свойства этого типа поглотителя влияют геометрия наноструктуры, расстояние между двумя соседними вершинами наноструктуры пирамидальной формы, а также материал и толщина подложки [11].

В длинноволновой области эффект от градиентного показателя преломления наряду с изменяющимся эффективным коэффициентом экстинкции и отражением (поглощением) подложки обеспечивает идеальное поглощение. Ширина верхней части не должна превышать 20 нм. Ширина нижней части может изменяться от 200 до 500 нм вместе с периодом, пока верхняя часть находится в диапазоне 3000–5000 нм.

Показано, что параметры следует тщательно выбирать с учетом как эффекта медленного света, так и эффекта градиентного индекса, чтобы достичь идеального поглощения как в гиперболической области типа II, так и в длинноволновой области. Геометрические параметры могут варьироваться в выверенных пределах и по-прежнему обеспечивать почти идеальное поглощение. Предлагаемая структура может дать возможность эффективного сбора солнечной энергии в процессах фототермического преобразования в воде или водных растворах.

1. Капингана А. А. Ж. Фотоэлектрическая энергия: эффективность преобразования, модуль и фотоэлектрические системы // Молодой ученый. 2021. № 11. С. 353.
2. Семченко И., Хахомов С., Самофалов А., Балмаков А. Метаматериалы и метаповерхности // Наука и инновации. 2020. № 8(210). С. 23–27.
3. Todorov T. K., Reuter K. B., Mitzi D. B. High-efficiency solar cell with earthabundant liquid-processed absorber // Adv. Mater. 2017. № 22. P. 156–159.
4. Немов С. А., Улашкевич Ю. В. О зонной структуре Bi_2Te_3 // Журнал технической физики. 2019. № 53(5). С. 608–623.
5. Квитко А. В., Отмахов Г. С. Перспективы и особенности работы солнечных фотоэлектрических станций // Научный журнал КубГАУ. 2017. № 131. С. 56–68.
6. Козина О. Н., Мельников Л. А. Оптические характеристики асимметричного гиперболического материала // Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Физика. 2019. № 2. С. 122–131.
7. Bansal N. K., Sawhney R. L., Misra A., Boettcher A. Solar sterilization of water // Sol. Energy. 2018. № 40. P. 35–39.
8. Esslinger M., Vogelgesang R., Talebi N., Khunsin W., Gehring P., Zuani S. D., Gompf B., Kern K. Tetradymites as natural hyperbolic materials for the near-infrared to visible // ACS Photonics. 2018. № 1. P. 1285–1289.

9. Давронов Ф. Ф. У., Нусратиллоев И. А. У., Тиллоев Л. И. Изучение характеристики физических поглотителей для очистки газов // Вопросы науки и образования. 2018. № 3(15). С. 54—55.
10. Kats M. A., Sharma D., Lin J., Genevet P., Blanchard R., Yang Z., Qazilbash M. M., Basov D. N., Ramanathan S., Capasso F. Ultra-thin perfect absorber employing a tunable phase change material // Appl. Phys. Lett. 2018. № 101. P. 221.
11. Narimanov E. E., Kildishev A. V. Metamaterials: naturally hyperbolic // Nat. Photonics. 2019. № 9. P. 214—216.

PHYSICAL ABSORBER OF SOLAR LEARNING BASED ON HYPERBOLIC METAMATERIAL

E. Yu. Lushpa

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

The article investigates the design of an absorber, which uses an array of pyramidal nanostructures made of natural hyperbolic metamaterial bismuth telluride (Bi_2Te_3) on a silver substrate. A numerical study is carried out to study the absorption of solar radiation and determine the appropriate ranges of geometric parameters of the proposed structure, immersed in a liquid medium — water. A high degree of absorption can be achieved even with some changes in these parameters. This study will help substantiate the theoretical basis for efficient collection of solar energy in the process of photothermal conversion, which is especially important for modern industrial technologies in mechanical engineering.

Keywords: bismuth telluride, broadband absorption, hyperbolic metamaterial, ideal absorber, photothermal transformation.

Bibliography — 11 references.

Received April 2, 2021

УДК 004:007:355:519.6:519.2:62
DOI: 10.52190/1729-6552_2021_2_49

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ БИОНИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ КАК СРЕДСТВО ЭФФЕКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В VUCA-МИРЕ — ИЗУЧЕНИЕ ЗАРУБЕЖНОГО ВОЕННОГО ОПЫТА

К. В. Пителинский, канд. техн. наук; **С. О. Маковей**; **М. П. Сигида**
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

С учетом концепции сетецентрических войн и наличия перспективной системы цифровизации поля боя TITAN (США) рассмотрена зарубежная робототехника, на основе которой может быть обеспечена данная парадигма и условия ее успешного функционирования в штатном режиме. Обсуждаются современные виды роботизированных систем, действующих на основе бионических принципов работы. Проведен анализ тенденций их развития и предложен способ классификации. Сделан вывод о перспективности широкого применения подобных систем в разных сферах человеческой деятельности.

Ключевые слова: робототехника, бионические принципы движения, животноподобные роботы, циклическое управление, НОРД, сетецентрическая война, система TITAN.

Активное развитие и применение робототехники началось в XX веке. Именно тогда были сформулированы основные принципы и определения, связанные с зародившимися новыми науками, такими как, информатика, электротехника, точная механика, кибернетика, машиностроение, космонавтика, системотехника, бионика, AI и т. д. Для дальнейшего развития данных направлений требовались серьезные вычислительные мощности. В последние два десятилетия достигнуты высокие темпы наращивания вычислительных мощностей (закон Мура). Это дало серьезный толчок развитию робототехники во всех сферах жизнедеятельности общества, в том числе и в военной сфере. В связи с применением нанороботов, информационных технологий, бионики и генной инженерии перед конечными потребителями открылись широкие перспективы [1].

В 2002 г. сотрудниками Военного колледжа армии США для описания реального (неопределенного, турбулентного, сложного и неоднозначного) мира введена концепция VUCA.

Пителинский Кирилл Владимирович, доцент, MBA, доцент кафедры "Информационная безопасность".
E-mail: yekadath@gmail.com

Маковей Сергей Олегович, студент кафедры "Информационная безопасность".
E-mail: sergej.magistr98@mail.ru

Сигида Максим Павлович, студент кафедры "Информационная безопасность".
E-mail: maxsigi@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2021 г.

© Пителинский К. В., Маковей С. О., Сигида М. П., 2021

Перечислим компоненты данной концепции:

- **Volatility (волатильность)** — скоротечные характер и динамика изменений, быстрая скорость изменения сил и катализаторов изменений;
- **Uncertainty (неопределенность)** — отсутствие предсказуемости, чувства осведомленности (т. е. понимания проблем и событий), неожиданность;
- **Complexity (сложность)** — баланс и сочетание сил, смешение вопросов, отсутствие причинно-следственных связей и путаница в организации;
- **Ambiguity (неоднозначность)** — размытость реальности, возможность ее неправильной трактовки, неясные условия, путаница в причинах и следствиях.

Позже VUCA нашла свое отражение в принципах стратегического лидерства, которые применяют для широкого спектра организаций (от коммерческих корпораций и до образовательных учреждений). Для реакции на внешние вызовы и угрозы государству надо быстро и точно отвечать на возникающие в VUCA-мире угрозы.

Концепция VUCA формирует канву лидерства и эффективного управления, когда организационная структура обладает видением своего текущего и будущего состояний, определяет границы планирования и управления стратегическим развитием и устойчиво реализует свою миссию. Суть VUCA часто связана с тем, как именно лица, принимающие решения (ЛПР), видят условия, в которых они планируют свои действия, определяют риски, принимают реше-

ния, способствуют переменам и снимают возникающие проблемы.

Концепция VUCA для самоорганизующихся систем позволяет:

- уяснить взаимосвязь факторов среды;
- прояснить ситуацию и найти благоприятные возможности;
- учесть различные ситуации и вызовы;
- указать на будущие проблемы и преодолеть их последствия.

По авторской [2] триаде управления социально-экономическими системами принципы VUCA распределены по всем ее элементам и преобразуются друг в друга циклически: *накопление и создание знаний—оценка рисков и принятие управленческих решений—экономическая и информационная безопасность.*

В организациях (армии, бизнесе, образовании, государственных структурах и т. д.) VUCA — практический стандарт информированности и готовности (совокупность знаний, создания моделей обучения для обеспечения готовности, ожидания, развития и вмешательства в ситуацию).

Инструментами имплементации в реальность замыслов лидера, оперирующего в циклическом фрактальном (самоподобном) VUCA-мире, служат циклические конструкции проектирования и реализации управленческих процессов, широко применяемые в различных сферах человеческой деятельности [3].

Рассмотрим *цикл Дж. Бойда* (цикл НОРД, петля OODA) — саморегулирующийся и самовоспроизводящийся кибернетический цикл управления из 4 процессов (наблюдения, ориентации, решения, действия) (рис. 1). Дж. Бойд предложил его для армии США, т. е. НОРД был создан для уяснения истоков военных побед.

Стороны военного конфликта принимают решения и действуют в рамках своей петли. При этом предполагается множественное повторение петли действий с реализацией принципа обратной связи. Непрерывно повторяясь, все соответствующие реальности процессы действуют постоянно, коммуницируя с окружающей средой и учитывая её постоянные изменения (рис. 1, 2).



Рис. 1. Обобщенный цикл НОРД для социально-экономических систем [4]

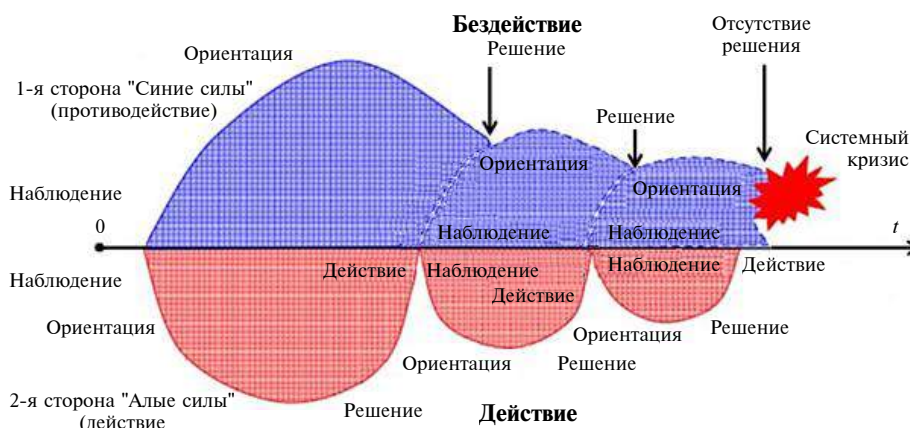


Рис. 2. Ситуация системного кризиса [5]

Существуют два базовых способа победы над противником: улучшить качество принимаемых решений; сделать свои циклы действий более быстрыми. Первый вариант — принятие решений, лучше соответствующих имеющейся ситуации, чем решения противника, или ухудшение качества решений противника (например, с помощью средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) или агентуры). Второй вариант позволяет действовать на опережение и вынуждает противника реагировать на действия (меньшая длительность петли Бойда, чем у противника, что предполагает большую квалификацию командного состава и применение систем поддержки принятия решений и искусственного интеллекта (ИИ)).

Наблюдается повсеместный переход от ведения традиционных боевых действий к сетцентрическим войнам (т. е. войнам, ориентированным на рост боевых возможностей за счет применения инновационных воинских формирований, дающих информационно-коммуникационное превосходство над противником посредством объединения участников боевых действий в единую сеть) благодаря созданию глобального информационно-коммуникационного пространства и повсеместному внедрению обеспечивающих и поддерживающих его технологий.

Данная концепция прошла долгий путь развития от теоретических изысканий, мозговых штурмов через имитацию и направленные эксперименты до практики, коренным образом изменив военную стратегию и инфраструктуру США. Это стало возможным из-за прихода информационной эпохи, появления инфокоммуникационных технологий [6] и ряда теоретических наработок адмирала США Дж. Джонсона, сотрудников Пентагона А. Себровски и Дж. Гарстка [7], маршала Советского Союза Н. Огаркова. Впервые в мире к формированию и практической реализации этой концепции пришла армия ВС США (подробно схемы сетцентрической войны даны в доктринах "Joint Vision 2010" и "Joint Vision 2020").

Фазы боевых действий в сетцентрической войне укрупненно даны в таблице. Они хорошо соответствуют этапам осенней войны 2020 г. в Нагорном Карабахе. Успех на каждой из фаз операции основан на существенно меньшей длительности цикла Бойда по сравнению с противником, что предполагает получение различными способами подробных сведений о нем.

Фазы боевых действий в сетцентрической войне

№	Состав
1	Информационное доминирование через превентивное уничтожение (или подавление) информационно-разведывательной системы обеспечения противника (логистических узлов, командных пунктов, узлов обработки данных и разведывательных комплексов)
2	Доминирование в воздухе через уничтожение (или подавление) системы средств противовоздушной обороны противника
3	Планомерное уничтожение дезорганизованных средств поражения противника с приоритетом авиации, артиллерии, ракетных комплексов и бронетехники
4	Полное уничтожение (или подавление) узлов сопротивления противника

Военные США предложили концепцию системы TITAN (Tactical Intelligence Targeting Access Node). Данная система должна интегрировать все источники наблюдения (спутники, средства кибервойны, радары, самолеты, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и т. д.) и организовывать выявление и передачу необходимых данных в режиме реального времени средствам огневого поражения, проводящим по установленным координатам уничтожение целей противника на всю глубину его расположения. Это также позволит сократить длительность реализации цикла Бойда. Базовым фактором успеха системы TITAN представляется наличие в ней мощного самообучающегося ИИ. В 2021 г. в США планируется создание прототипа TITAN, а ее испытания в реальных условиях пройдут в 2022 г. (при согласовании действий военных и подрядчиков). Разработчики системы указывают на затруднения со стандартизацией, непроработанность ее ИИ и на трудности с интеграцией в экосистему различных сил и средств (рис. 3 и 4).

Тем не менее война в Карабахе, где обкатывались лишь отдельные малые элементы подобной концепции, показала ее явные достоинства. Поэтому создание аналогичных интегрированных интеллектуальных систем скоро станет значимым милитаристским трендом у технологически развитых государств. Эффективными средствами победы над противником в сетцентрической войне выступают, в частности, автоматизированные системы управления ведением боевых действий и роботизированная военная и обеспечивающая техника, о которой подробнее будет сказано далее.



Рис. 3. Применение концепции TITAN в сетцентрической войне [8]

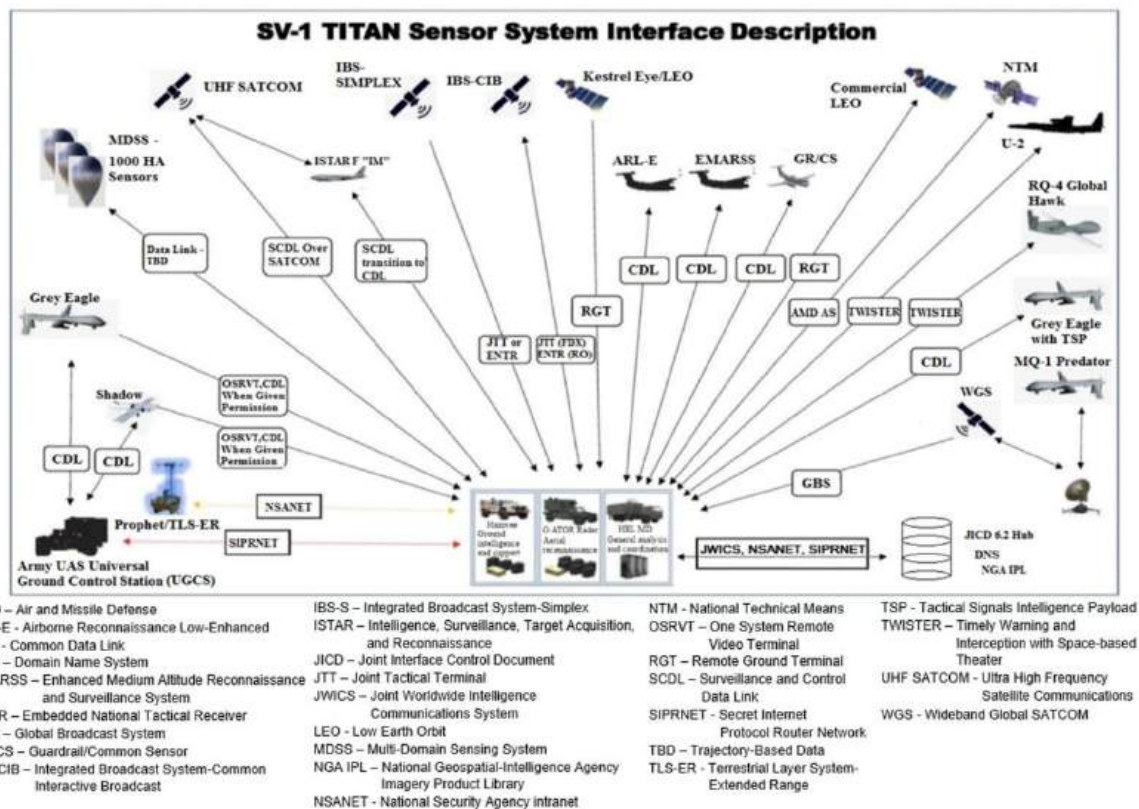


Рис. 4. Применение системы источников наблюдения в рамках системы TITAN [8]

Военное руководство стран НАТО считает роботизацию сухопутной техники приоритетным направлением развития средств вооруженной борьбы. В США по планам военно-политического руководства к 2035 г. должны появиться полностью автономные наземные робототехнические средства (НРТС), функционирующие в едином информационном пространстве ведения боевых действий, эффективно и безопасно взаимодействуя между собой и с человеком. После 2045 г. ожидают почти полного вывода человека с передовой с делегированием НРТС функций применения оружия [9].

Военно-политическое руководство РФ указало область применения боевых и обеспечивающих роботов и внесло предложения по их составу. Внедрение НРТС начато с созданной в Министерстве обороны РФ программы "Создание перспективной военной робототехники до 2025 г.". Главная задача внедрения НРТС — замена человека на интеллектуальную систему, способную выполнять поставленные боевые задачи непосредственно на поле боя (сюда входят разведка, разминирование, эвакуация раненых и т. д.). Развитие военной робототехники (и принятие на вооружение армиями ведущих иностранных государств боевых НРТС), с одной стороны, и отсутствие четкой позиции боевых роботов в организационно-штатной структуре мотострелковых подразделений, с другой, предполагает определение места и роли боевых НРТС в штатных воинских подразделениях. Эта задача особенно актуальна в контексте полной или частичной замены пехотинца мотострелковой части при наступательной или оборонительной операции [10].

В развитых странах бурно развиваются мобильные военные роботы (в том числе и на бионических принципах движения). Это не всегда ведет к созданию машин, пригодных для военного использования, но на базе разработанных образцов появляется и множество гражданских роботов, получающих массовое применение. Разработкой новых роботов на основе бионических принципов для военных целей занимаются многие как развитые, так и развивающиеся страны. Почти ни одна военная выставка или конференция не обходится без презентации подобных роботов. Так, например, на Пекинской международной выставке оборонных технологий в 2020 г. были представлены опытные образцы бионических военных роботов, похожих на водных животных, рыб и акул [11].

Эти образцы достаточно разноплановы, начиная со сложных роботов, чьим прототипом являются марокканские пауки, передвигающие-

ся кувычками и перекатами, и заканчивая аппаратами, имитирующими рыб. Всех их объединяет источник принципов движений и поведения. Они являются бионическими (т. е. основаны на существующих живых организмах) (рис. 5 и 6). Полная картина того, какие именно разработки ведутся на данную тему (их классификация, массовость производства, сферы применения и т. д.), неясна — соответствующая информация из-за своей высокой ценности засекречена. Опираясь только на открытые источники и на гражданские образцы, можно насчитать десятки уже разработанных на данный момент или массово производимых роботов.

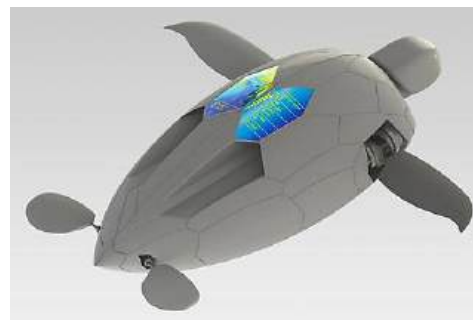


Рис. 5. Патрульный робот-черепаха [12]

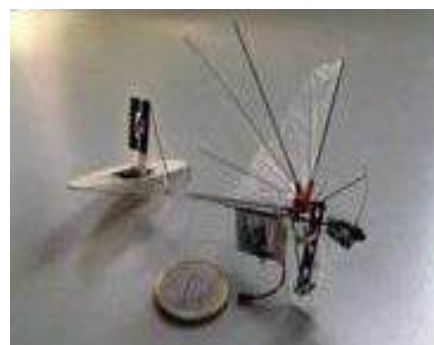


Рис. 6. Шпионский робот-колибри [13]

Промышленно-ремонтная и логистическая инфраструктуры. В мире майнстримом является автоматизация промышленности. Чтобы поставить робота в цепочке производственного бизнес-процесса, необходимо автоматизировать фактически всю инфраструктуру предприятия. Разработка робототехники закономерно ведет к развитию обслуживающих инфраструктур (продажа и покупка, техническое обслуживание, ремонт, замена комплектующих). Возникнет и сопровождающая бизнес-инфраструктура (производство продуктов питания для техников, химикатов для роботов-уборщиков, запасного инструмента и принадлежностей для ремонта роботов и т. д.).

На межгосударственный уровень выходит проблема большого количества нападений на промышленную инфраструктуру (от экологов и погромщиков до профессиональных террористов). Более того, с ростом цифровизации в данной отрасли растет и ее уязвимость к кибератакам. Защита промышленной инфраструктуры от информационных угроз требует принятия целого комплекса технических и программно-аппаратных мер. Одним из них является комплекс ARMA, представленный InfoWatch, ориентированный на защиту промышленных сетей, рабочих станций и серверов систем диспетчерского управления (SCADA-систем) и полностью соответствующий нормам законодательства РФ по защите критически важных инфраструктурных объектов.

Когда речь идет о возможности применения робототехники в военной сфере, невозможно обойтись без надлежащих средств ее защиты от потенциальных рисков, связанных с выводом роботов из строя на поле боя. Основными видами таких рисков являются электромагнитные импульсы (ЭМИ) и перехват управления.

Методы защиты от ЭМИ. Опасность ЭМИ состоит в том, что они могут нанести критический ущерб техническим и технологическим системам. Клетка Фарадея — средство для защиты от рассматриваемого риска. Ее использование способно произвести защиту и от генератора сжатия магнитного потока. Однако импульс от электромагнитной бомбы за счет высокой частоты может преодолеть защитные системы (в том числе и клетку Фарадея). В США начат поиск возможных способов защиты электроники от ЭМИ. Вероятно, их основные усилия направлены на использование высокотемпературных сверхпроводников для установки сильных электромагнитных полей.

Методы защиты от перехвата управления. К методам защиты от перехвата управления относят:

- применение шифрования при обмене информацией между дроном и оператором;
- тщательное тестирование функциональных характеристик роботов;
- создание автономных военных роботов, которые будут действовать как можно этичнее, как солдаты-люди. Однако здесь существуют серьезные проблемы (программирование робота, четко различающего врага и мирных жителей согласно законам войны и правилам проведения боевых действий, и другие);
- работа APSs (программное обеспечение для производственного планирования) в беспилотных системах контролируется автономно, но для большей эффективности необходимо управ-

ление людьми. Опыт показывает, что при установке на беспилотную систему оно отключается в случае сбоя связи с удаленным оператором. Поскольку APSs имели ограниченное применение в боевых действиях, мало что известно о доктринах, регулирующих их применение, и о последствиях, которые их применение может повлечь для гражданских лиц или дружественных сил;

- наличие аварийной системы самоуничтожения или принудительной остановки в случае сбоя или подозрительных действий в системе.

Обеспечение энергонезависимости объекта. Когда возникает вопрос о сроке использования роботизированных систем в действии, идеальным значением, очевидно, является бесперебойное питание либо возможность перезарядки батареи без вмешательства человека. Компания Wibotic (США) представила решение данной проблемы: беспроводное зарядное устройство, позволяющее роботу совершать перезарядку батареи "на ходу", что исключает риск отключения сетевых устройств и зарядных станций [14]. Такое решение можно использовать вне зависимости от характеристик робота.

Применение робототехники в военной сфере. Руководством вооруженных сил РФ дана высокая оценка важности проблемы роботизации. Разработаны и приняты к исполнению следующие нормативы для военных робототехнических комплексов [15]:

- "Концепция применения робототехнических комплексов военного назначения на период до 2030 года" (утверждена 22.08.2014);
- комплексная целевая программа "Создание перспективной военной робототехники на период до 2025 года с прогнозом до 2030 года" (КЦП "Роботизация-2025", утверждённая Министром обороны РФ 10.10.2014);
- "Концепция роботизации наземного и морского вооружения, военной и специальной техники ВС РФ в период до 2025 года" (утверждена 24.07.2010);
- "Концепция применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами в ВС РФ на период до 2025 года" (утверждена 17.04.2009);
- "Межведомственная комплексная целевая программа развития отечественных комплексов с БЛА и оснащения ими ВС РФ на период до 2025 года" (утверждена 27.09.2012).

Отметим и опыт США — мирового лидера инновационных технологий обороны и безопасности. В МО США роботы создаются в рамках специальных военных программ:

- "Объединенная программа роботизации" (Joint Robotics Program);

- "Боевые системы будущего" (Future Combat Systems);

- план "Основные направления развития (Unmanned Systems Roadmap) безэкипажных и беспилотных систем на 2007—2032 гг.". Уточняется ежегодно по изменениям военно-политической обстановки в мире и по продвижениям научно-технического прогресса.

США и РФ уделяют большое внимание развитию и внедрению военных роботов и, несомненно, будут все активнее внедрять их в состав своих вооруженных сил. В скором времени все больше стран предполагают развивать и внедрять технологии военных роботов.

В связи с новизной и бурным ростом числа новых разработок в данной области еще не было приведено полного обзора бионических роботизированных аппаратов. Нигде не приведена и классификация, охватывающая все разработки, которые используют бионические принципы движений живых организмов.

Способы классификации. Можно выделить множество способов кластеризовать подобные аппараты в связи с большим их разнообразием. Для точной и корректной кластеризации необходимо выделить признак или группу признаков бионических роботов, по которым будет производиться сравнение (применимых как к любым роботизированным аппаратам, так и только к узкоспециализированной технике).

Время работы без подзарядки. Это простая характеристика, легко определяемая для любого робота. Она очень важна и может существенно повлиять на выбор конкретного робота ввиду своей общей применимости к любому беспроводному электронному устройству, но не несет должной смысловой нагрузки, позволяющей использовать ее для кластеризации объектов изучаемого вида робототехники.

Интегральная метрика скрытности определяет уровень заметности роботизированного аппарата для противника. Она хорошо подходит для аппаратов и бионических роботов, осуществляющих функции разведки или для скрытно перемещающихся устройств, но многие роботизированные аппараты подразумевают открытое использование и данная метрика к ним неприменима.

Кластеризовать технику, работающую по бионическим принципам, нужно по группе признаков и характеристик, применимых ко всем роботам своего вида и максимально подчеркивающих их особенности и отличия не только друг от друга, но и от других роботов (которых в целом нельзя отнести к бионическим).

Для максимизации данных требований можно использовать машинное обучение. Выделим за-

дачи, часто встречающиеся при машинном обучении, которые эффективно решаются:

- классификации — определение отношения объекта к некоторому заранее известному классу (например, по фотографии танка определить его тип и модель);

- регрессии — предсказание количественного или порядкового показателя (например, по данным разведки определить количество вражеской военной техники);

- кластеризации — разделение множества объектов на неизвестные классы (именно к задаче кластеризации относится проблема выделения различных классов внутри множества роботизированных аппаратов).

Почти все алгоритмы кластеризации основаны на пространственной плотности объектов (все объекты расположены в одном проектном гиперпространстве, где каждая ось базиса является некоторым признаком, присутствующим у всего множества объектов). Определив признаки для всех аппаратов и передав их любой модели машинного обучения, разделяющей объекты в гиперпространстве, получаем выделенные кластеры. Можно использовать модели, обученные разными алгоритмами кластеризации (начиная с k -means и заканчивая более сложными типа k -medods, DBSCAN и т. д.). Однако неизвестно точное число классов, которые оптимально разделяют объекты, при этом число классов будет гиперпараметром (признаком, задаваемым при обучении модели). Получим несколько кластеров, объекты в которых максимально отдалены от объектов в других кластерах в гиперпространстве, что позволит выделить группы максимально схожих между собой (но максимально отличных от остальных) аппаратов.

Остается серьезная проблема — по каким именно признакам будут строиться модели машинного обучения и, как следствие, выделяться кластеры. Для возможности построения проектного гиперпространства необходимы признаки (некоторые присущие всем объектам свойства, например масса). Признаки должны быть максимально полезны для модели. Однако определить, какой именно вклад вносит отдельный признак в итоговый результат моделирования, можно, лишь обучив модель.

Укажем способы выделения признаков объектов для моделей машинного обучения.

- *Ручное выделение признаков и их группировка в таблицу.* Недостаток метода — сложность выделения широкого списка признаков, присущих всем объектам, и отсутствие гарантии того, что не появятся новые аппараты с отличными от нынешних признаками (обученные модели и

собранные данные могут не работать в новых условиях).

- *Выделение признаков на основе фотографий роботизированных аппаратов.* Данный метод лишен недостатков табличного метода. Его недостаток — малая интерпретируемость разделения на кластеры (в одном кластере оказываются абсолютно разные, по мнению человека, аппараты, например роботизированные акула и аист). Если пары роботов рассматривать отдельно, то сразу видны их различия, но при рассмотрении множества роботов помимо них в гиперпространстве у таких двух ("разных") аппаратов может оказаться очень много общих черт относительно множества прочих аппаратов.

При классификации новой разработки или робота, который изначально не был отнесен к какому-либо кластеру, системному аналитику необходимо видеть модель (нужно как минимум знать границы кластеров в гиперпространстве и занести в гиперпространство новый объект, задающий подлежащий классификации аппарат), что сильно затрудняет массовую и самостоятельную классификацию.

По мере использования и классификации все большего количества бионических роботов возникает проблема применения избранного способа классификации. Высока вероятность того, что первая построенная модель не дообучилась на данных, которые с ее помощью начинают классифицировать (при обучении было слишком мало примеров по сравнению с текущим временем, или произошли изменения в технологиях и роботы стали сильно отличаться от тех, по которым была построена модель). Возникает необходимость в новой модели, что ведет к изменению границ или к выделению новых кластеров. Частоту и необходимость обучения новой модели нужно оценивать по уровню необходимости и оправданности (корректная модель при обучении на большем объеме данных может переучиться и начать хуже классифицировать).

Возможно и ручное выделение некоторого абстрактного признака, присущего всем бионическим роботам, имеющего настолько большую

корреляцию со всеми остальными признаками, что классифицируя только по нему, можно добиться максимального и корректного разделения всего множества роботов сразу по множеству признаков (без необходимости выделять и оценивать их все сразу).

Для примера рассмотрим классификацию войск (т. к. большинство бионических роботов разрабатывалось для военных целей или было создано на основе таких роботов).

Государства, имеющие выход к морю, обычно подразделяют вооруженные силы на три рода:

- *военно-воздушные силы*, предназначенные для выполнения боевых задач в воздухе и осуществления атаки с воздуха;
- *военно-морской флот* — силы, выполняющие боевые задачи в пределах водной среды, в морях и океанах;
- *сухопутные войска*, чьей зоной непосредственного действия является суша.

У некоторых стран есть и *космические войска*, предназначенные для выполнения боевых задач в космическом пространстве и из него. Аналогично можно разделить роботов, предназначенных и способных действовать в определенном месте пространства (*воздушном, наземном, водном, космическом и подземном*).

Массовое и повсеместное использование робототехники (особенно бионической, опирающейся на проверенные за миллионы лет эволюции природные морфологические принципы) позволит ЛПР не только сократить время принятия управленческих решений, но и повысить их качество (при общем снижении расхода ресурсов, требуемых для их реализации). Авторская классификация наглядна и позволяет без дополнительных усилий и технических средств классифицировать любой новый бионический аппарат. Аппараты одного класса имеют много близких по значениям признаков и специфических свойств (так, воздушные бионические роботы будут иметь близкие функции и способы использования, а их движители будут максимально похожи, поскольку их прототипами являются схожие между собой реальные птицы).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пителинский К. В.** Динамика изменений техносферы, биосферы и ноосферы Земли: некоторые результаты применения инновационных технологий // Вестник московского института лингвистики. 2014. № 2. С. 126—130. <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-izmeneniy-tehnosfery-biosfery-i-noosfery-zemli-nekotorye-rezultaty-primeneniya-innovatsionnyh-tehnologiy>
2. **Пителинский К. В.** Триада управления социоэкономическими системами. — М.: ММА, 2017. — 324 с.
3. **Пителинский К. В.** Информационно-кибернетические аспекты управления обществом. Сильное государство — выбор народов России. Угрозы, ценности, приоритеты / под ред. Братищева И. М. — М.: ООО "ИТК "Дашков и К", 2019. С. 225—246.

4. Цикличность — это важно. Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://becmology.ru/blog/management/cycle01.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
5. Ивлев А. А. Основы теории Джона Бойда. Принципы, применение и реализация [Электронный ресурс]. URL: <http://www.milresource.ru/Boyd.html> (дата обращения: 30.01.2021).
6. Савин Л. В. Сетецентричная и сетевая война. Введение в концепцию. — М.: Евразийское движение, 2011. — 130 с. NCW.indd (geopolitica.ru)
7. Cebrowski, Arthur K., John J. Garstka Network-Centric Warfare: Its Origins and Future. — U. S.: Naval Institute Proceedings, 1998.
8. Tactical Intelligence Targeting Access Node (TITAN) [Электронный ресурс]. URL: <https://colonelcassad.livejournal.com/6356357.html> (дата обращения: 30.01.2021).
9. Лопота А. В., Николаев А. Б. Наземные робототехнические комплексы военного и специального назначения. — СПб.: ЦНИИ РТК, 2015. — 30 с. <https://rtc.ru/media/images/docs/book/nazemnie.pdf>
10. Жирнов М. В., Митрофанова С. В., Федорова Е. В. Боевые наземные робототехнические средства в мотострелковых подразделениях: обоснование интеграции и варианты применения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 14. С. 16. <https://cyberleninka.ru/article/n/boevye-nazemnye-robototekhnicheskie-sredstva-v-motostrelkovykh-podrazdeleniyah-obosnovanie-integratsii-i-varianty-primeneniya/viewer>
11. Китайская международная выставка оборонной электроники [Электронный ресурс]. URL: <https://baike.baidu.com/item/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%9B%BD%E9%99%85%E5%9B%BD%E9%98%B2%E7%94%B5%E5%AD%90%E5%B1%95%E8%A7%88%E4%BC%9A/1053413> (дата обращения: 30.01.2021).
12. Ackerman Evan Cowabunga: Swiss Boffins Working on Robot Turtle [Электронный ресурс]. URL: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/cowabunga-swiss-boffins-working-on-robot-turtle> (дата обращения: 30.01.2021).
13. Робот-птица — миниатюрные американские ВВС! [Электронный ресурс]. URL: <http://transforms.ru/roboty-shpiony/robot-ptitsa-%E2%80%93-miniaturnye-amerikanskie-vvs.html> (дата обращения: 30.01.2021).
14. Беспроводное зарядное устройство и решение по оптимизации энергопотребления Wibotic для обеспечения автономной работы роботов [Электронный ресурс]. URL: <http://digitrode.ru/articles/2702-besprovodnoe-zaryadnoe-ustroystvo-i-reshenie-po-optimizacii-energopotrebleniya-wibotic-dlya-obespecheniya-autonomnoy-raboty-robotov.html> (дата обращения: 30.01.2021).
15. Робототехника через двадцать лет [Электронный ресурс]. URL: <https://www.computer-museum.ru/articles/istoriya-vychislitelnoy-tekhniki-za-rubezhom/2053/> (дата обращения: 30.01.2021).

ROBOTIC BIONIC DEVICES AS A MEANS OF EFFECTIVE IMPLEMENTATION OF MANAGEMENT DECISIONS IN THE VUCA WORLD-STUDY OF FOREIGN MILITARY EXPERIENCE

K. V. Pitelinskiy, S. O. Makovey, M. P. Sigida
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Taking into account the concept of network-centric wars and the presence of a promising system of digitization of the battlefield TITAN (USA), foreign robotics is considered, on the basis of which this paradigm can be provided and the conditions for its successful functioning in normal mode. Modern types of robotic systems operating on the basis of bionic principles of operation are also discussed. An analysis of the trends of their development is given and a method of classification is proposed. The conclusion is made about the prospects of wide application of such systems in modern realities in various spheres of human activity.

Keywords: robotics, bionic principles of motion, animal-like robots, cyclic control, NORD, network-centric warfare, TITAN system.

Bibliography — 15 references.

Received April 2, 2021

УДК 629.052.3

DOI: 10.52190/1729-6552_2021_2_58

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ NEXTNAV

В. В. Кабаков

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

Исследуется возможность использования сигналов наземной системы позиционирования NextNav для совместной работы с пассивными радарными в масштабе городской среды. Представлен краткий теоретический анализ, описывающий эффективность наземных навигационных сигналов на примере американской системы NextNav. В экспериментальной части показано, что с помощью пассивной радиолокационной системы, которая использует передачу наземного позиционирования в бистатическом диапазоне 10 км, можно наблюдать за объектами гражданской авиации (на примере пассажирского самолета).

Ключевые слова: пассивный радар, радионавигационная система NextNav, наземная навигация, коды Голда, эффект Доплера.

В современном мире радиочастотный (РЧ) спектр становится сильно перегруженным, в результате чего доступность частот для применения в радиолокационных системах является ограниченной. Использование выделенной полосы пропускания для многих радарных систем затрудняется. Возможность применения специальных сигналов дальнего действия для радиолокационных систем приобретает популярность не только в США, но и в России. Такие сигналы обычно оптимизируют для их основного назначения (например, связи). Однако использование сигналов дальнего действия для радиолокации требует тщательного подхода. Их использование для пассивного радара является оптимальным, поскольку эти системы обеспечивают резкие корреляционные пики, а их структура меньше зависит от данных полезной нагрузки [1].

Рассмотрена пассивная радиолокационная система на базе наземной радионавигационной системы NextNav. Доказано, что функционирование пассивных радаров может быть улучшено благодаря использованию других передатчиков (например, цифровое телевидение и беспроводные сети) [2]. Использование наземных навигационных сигналов представляет практический интерес, поскольку применение мощных, точно рассчитанных по времени и структурированных

дальномерных сигналов дает преимущества для использования их совместно с пассивными радарными. По мере усовершенствования регулирования и развития этих наземных навигационных систем их использование в пассивных радиолокационных системах становится все более насущным [3].

Использование сигнала NextNav

Основной целью сигнала NextNav является определение местоположения в городских районах, которые перегружены системами спутникового позиционирования (GPS и т. п.). Навигационная система NextNav использует несколько маяков, размещенных по всему городу, которые передают сигналы, специально предназначенные для определения дальности [4]. Прием нескольких сигналов обеспечивает определение местоположения (аналогия с GPS). Экспериментальная часть исследования выполнена в Закрытом административно-территориальном образовании Звездный городок (Московская область, Россия), где была развернута и функционирует система NextNav, созданная американскими исследователями (Калифорния, США).

Чтобы упростить реализацию в персональных устройствах (смартфонах и т. д.), NextNav использует дальномерные сигналы с теми же кодами Голда с модуляцией BPSK, что и GPS. Для обеспечения спектральной эффективности к сигналу перед передачей применяют полосовой фильтр на частоте 2,046 МГц.

Кабаков Виталий Валериевич, старший преподаватель.
E-mail: ser-kvv73@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2021 г.

© Кабаков В. В., 2021

В отличие от GPS сигнал не непрерывен, а является импульсным с рабочим циклом 10 %. Несущая частота находится в S-диапазоне (900 МГц), а информацию, структуру и кодирование сообщения данных получает непосредственно пользователь системы. Каждый импульс имеет длительность 99 мс и содержит 99 полных периодов кодов Голда. В конкретном эксперименте замечено, что местные маяки передают свои импульсы один раз в секунду на двух разных частотах [5].

Временные интервалы передачи определяют относительно времени GPS. Все импульсы имеют один и тот же код Голда длиной 7 или 4 мс. Остальная часть импульса содержит коды Голда, назначенные отдельным передатчиком. Эта часть может содержать или не содержать сообщение, модулированное со скоростью в один бит на период кода ранжирования. Каждую секунду можно наблюдать три последовательных импульса от разных радиомаяков (см., например, [6]).

Теоретический анализ характеристик сигнала NextNav

Представим краткий теоретический анализ характеристик сигнала NextNav, связанных с применением пассивных радаров. Полная энергия, передаваемая в каждом импульсе, является основным фактором, влияющим на максимальный наблюдаемый диапазон. Общую энергию E_{Tx} получают путем интегрирования мощности сигнала по длительности импульса:

$$E_{Tx} = \int_0^{T_p} P_s(t) P^2 dt \approx E_{PR} T_p, \quad (1)$$

где t — время, мс

T_p — длительность импульса, мс.

Предполагается, что E_{PR} составляет 30 Вт, за импульс передается примерно 3 Дж энергии. Разрешение по дальности сигнала NextNav в основном определяется занимаемой полосой пропускания. В этом случае полоса пропускания от нуля до нуля составляет 2,046 МГц (вдвое больше частоты дискретизации кода дальности), в то время как разрешение по расстоянию (основанное на ширине пика автокорреляции в 3 дБ) составляет приблизительно длительность одного чипа (~1 мкс; 300 м). Код выбора диапазона является периодическим в пределах 1 мс, поэтому существует неоднозначность измерения диапазона. Тем не менее эта неоднозначность выходит далеко за пределы максимальной дальности действия пассивного радара [7].

На рис. 1 приведен пример функции неоднозначности доплеровской задержки сигнала NextNav. Для генерации указанной цифры использованы реплики сигнала со случайными битами данных.

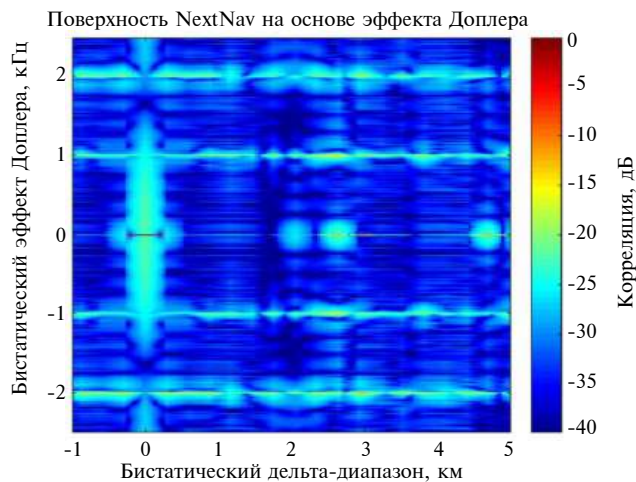


Рис. 1. Бесшумная задержка на доплеровской карте импульса NextNav с преамбулой длиной 4 цикла и случайными данными

Бистатический дельта-диапазон определяется как разница между всей длиной пути эхосигнала и длиной пути прямого сигнала [8]. Из-за большого времени интегрирования доплеровская ширина главного "лепестка" больше 5 Гц, в то время как разрешение по дальности определяется шириной полосы 2,046 МГц. Незначительные боковые "лепестки" на протяжении всей функции неоднозначности обусловлены повторением кода Голда, а также использованием двух разных кодов Голда для частей преамбулы и входных данных. Выигрыш от обработки достигим за счет интегрирования импульса более 99 мс. Если спектральная плотность мощности (PSD) записывается в форме синк-квадрата, ширина полосы при 3 дБ (B_{3dB}) составляет 0,9 МГц. При интегрировании всего импульса NextNav теоретический выигрыш при обработке становится равным

$$G_p = B_{3dB} T_{int} \approx 49,5 \text{ дБ}. \quad (2)$$

В случае простого прямоугольного импульса при тех же энергии и разрешении по дальности потребуется пиковая мощность 3 МВт. Покрывание пассивной радиолокационной системы на основе NextNav может быть количественно определено в пределах доступного отношения

сигнал/шум, которое задается модифицированным уравнением бистатического радара:

$$\text{SNR}_{\text{det}} = \frac{E_{PR} G_{R_x} \lambda^2 \sigma_{bi} G_p}{(4\pi)^3 (R_{Tx} R_{Rx})^2 k T B_n F L_{DSI} L}, \quad (3)$$

где λ — длина волны, м;
 R_{Tx} и R_{Rx} — расстояния от цели и до передатчика соответственно, м;
 k — постоянная Больцмана, Дж·К⁻¹;
 T — эталонная шумовая температура (290 К);
 B_n — ширина полосы шума приемника (2,2 МГц);
 F — коэффициент шума (4 дБ);
 L_{DSI} — потери, вызванные подавлением несовершенных прямых помех сигнала (DSI) (10 дБ);
 L — прочие потери (оцениваются как 7 дБ).

Если предположить, что поперечное сечение бистатического радара коммерческого самолета 40 дБм², а усиление приемной антенны 13 дБ, то результирующая карта покрытия SNR будет иметь вид, приведенный на рис. 2.

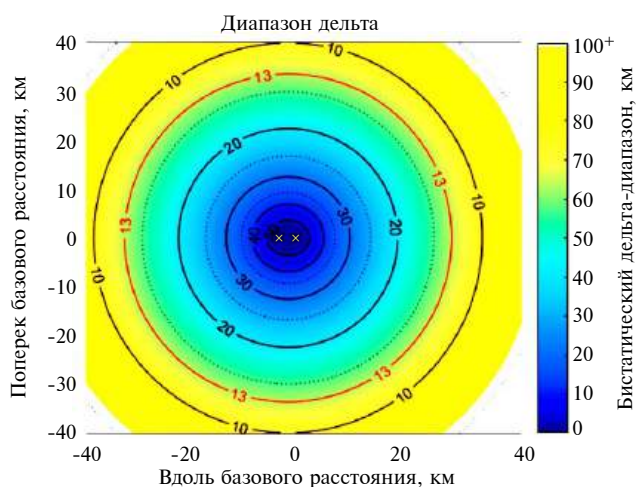


Рис. 2. Расчетное покрытие одной пары Tx-Rx (отмечены крестиками). Цветовой градиент представляет дельта-бистатический диапазон

Контур 13 дБ выделен, поскольку это классический предел обнаружения, основанный на вероятности 10^{-6} ложных срабатываний для целевой модели Swerling. Бистатический дельта-диапазон отображен в виде цветового градиента. Контур отношения сигнал/шум 13 дБ приблизительно соответствует бистатическому дельта-рангу длиной 50 км.

Экспериментальное исследование

Для проверки теоретических предсказаний проведен эксперимент с двухканальной приемной системой. Два модуля программно-определяемых приемников (SDR) Ettus Research USRP N210 использовались с обычными опорными сигналами частоты 10 МГц и 1 PPS (импульс в секунду) с синхронизацией по GPS. Несмотря на то что приемники использовали общий генератор, захват был инициирован программным обеспечением. Поэтому необходимо было оценить неизвестное межканальное смещение. Для обоих каналов приемника использовали одинаковые антенны Ягу-Уда (усиление 13 дБ) [9]. Контрольный канал применяли для захвата наилучшего возможного прямого сигнала от маячка NextNav.

Поэтому антенна была вертикально поляризована и ориентирована на маячковый режим. Канал наблюдения использовали для захвата эхо-сигнала от самолетов, а антенна была направлена в сторону прибывающего воздушного движения, причем немного наклонена вверх [10]. Следует отметить, что приемная система была расположена на траектории захода на посадку в Международном аэропорту Жуковского (Московская область, Россия), что позволяло надежно наблюдать за крупными самолетами на малых высотах. Горизонтальная поляризация использовалась для канала наблюдения, чтобы уменьшить несовершенные прямые помехи. Примерная геометрия приведена на рис. 3.

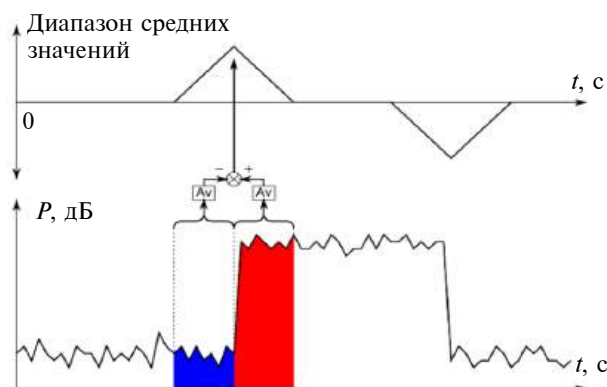


Рис. 3. Принципиальная схема поиска начала импульса

Азимут падения несовершенных прямых помех составлял приблизительно 120° по отношению к главному "лепестку" антенны, где ожидалось только второстепенные боковые "лепестки" диаграммы направленности.

Предварительную обработку сигнала проводили следующим образом. На первом этапе сиг-

нал был сдвинут по частоте, чтобы одна из двух полос NextNav оказалась в середине спектра основной полосы частот. Сигнал был подвергнут фильтрации нижних промежуточных частот и субдискретизирован до 2,5 MSPS. Отношение (разницу по шкале дБ) мощности сигнала в двух соседних окнах скользящего среднего использовали для обнаружения начала импульса (см. рис. 3). Логарифмическое представление мощности сигнала было усреднено, поскольку этот подход оказался более корректным к импульсным помехам, присутствующим в записи. Из-за неизвестной межканальной задержки необходимость в точной оценке начала импульса отсутствовала.

Согласование сигналов и уменьшение влияния несовершенных прямых помех было осуществлено по методу *фильтрации Винера* с конечной импульсной характеристикой, который используют для оценки вклада несовершенных прямых помех сигнала в канале наблюдения. Предполагается, что оба сигнала являются стационарными во время передачи импульса [11]. Фильтр Винера определяется как

$$\hat{S}_s[k] = \sum_i \hat{a}_i s_r[k-i] + e[k], \quad (4)$$

$$\hat{a} = \arg_a \min E \{ \Pi e[k] \Pi^2 \}, \quad (5)$$

где S_s — наблюдение;

s_r — сигнал опорного канала;

a — комплексные коэффициенты отвода фильтра;

e — остаточная ошибка, которая должна быть минимизирована методом наименьших квадратов.

Оценку несовершенных прямых помех получают путем простой свертки (т. е. фильтрации опорного сигнала):

$$S_{DSI}[k] = \sum_i \hat{a}_i s_r[k-1]. \quad (6)$$

Предполагаемый вклад несовершенных прямых помех сигнала S_{DSI} затем вычитают из исходного сигнала канала наблюдения:

$$S_{sm}[k] = S_s[k] - S_{DSI}[k]. \quad (7)$$

Вторичным продуктом фильтрации Винера являются коэффициенты, которые обычно содержат пик большой амплитуды, представляющий задержку прямого пути сигнала NextNav (рис. 4).

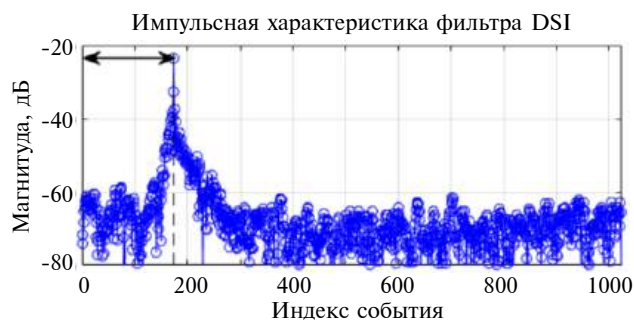


Рис. 4. Типичная величина импульсной характеристики фильтра DSI. Межканальная задержка отображена двойной стрелкой

Положение этого пика во временной области можно использовать для оценки задержки между каналами, чтобы выровнять опорные сигналы должным образом. Когда расчетная задержка превышает определенный порог, сигнал сдвигается во времени и фильтрация Винера пересчитывается с правильно выровненными ходами.

Оценка карты доплеровской дальности проводится с использованием следующих параметров:

$$DD[\Omega_d, l_\tau] = \sum_k \hat{s}_{sm}[k] \exp(-jk\Omega_d) s_r[k-l_\tau]^*, \quad (8)$$

где l_τ — корреляционная задержка в выборке, мс;

Ω_d — дискретное представление доплеровского сдвига частоты, Гц;

* — комплексное сопряжение.

Дискретное доплеровское выражение представлено с использованием непрерывной частоты и частоты дискретизации:

$$\Omega_d = 2\pi \frac{f_D}{f_{sa}}. \quad (9)$$

Задержка, представленная запаздыванием корреляции, преобразуется в бистатистический дельта-диапазон:

$$\rho_{bi\Delta} = \tau c_0 = l_\tau \frac{c_0}{f_{sa}}, \quad (10)$$

где τ — задержка в непрерывной области, мс;
 c_0 — скорость света, м/с.

Результаты

Экспериментальная карта доплеровской дальности представлена на рис. 5, где изображен пассажирский самолет (выделен кружком) [12].

Цель на изображении четко различима. Энергия эхо-сигнала распространяется на неожиданное количество доплеровских интервалов из-за интервала интегрирования длиной 99 мс. Данный эффект значим для обнаружения на более близком расстоянии, поскольку доплеровская частота и скорость изменения дальности значительно выше. Это ставит под сомнение предположение о стационарности сигнала и предполагает, что изменяющаяся во времени адаптивная фильтрация может дать лучшие результаты. В обоих случаях несовершенные прямые помехи сигнала практически полностью подавляются на нулевой доплеровской частоте. Тем не менее остатки несовершенных прямых помех сигнала и помехи присутствуют вблизи начала координат. В том числе заметны пики на частоте ± 1 кГц, обусловленные структурой сигнала. Значения доплеровского сдвига и дальности соответствуют наблюдаемой траектории самолета.

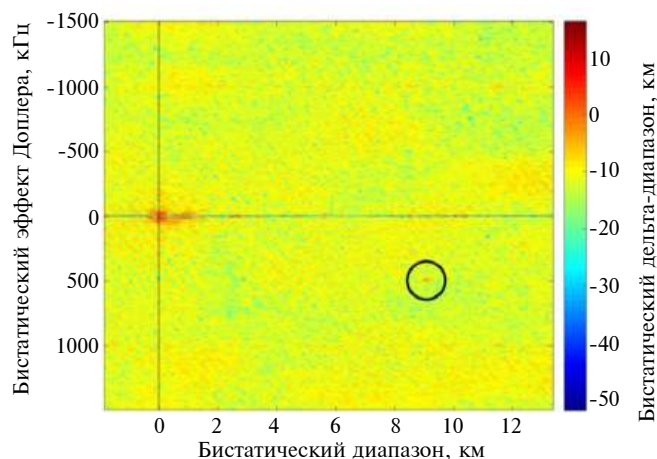


Рис. 5. Дистанционные доплеровские карты со следом приближающегося самолета. Трасса самолета при дельта-бистатическом диапазоне 9 км

Результирующая карта покрытия обнаруженных целей показала, что произошло снижение мощности полученного сигнала. Предполагает

ся, что потеря мощности может быть вызвана рядом неизвестных в эксперименте факторов. Например, антенны могут обеспечивать меньшее усиление в направлении самолета как на стороне передатчика, так и на стороне приемника, поскольку используемый зашумленный опорный сигнал повышает уровень шума. Также сделаны допущения относительно дополнительных потерь на приемной стороне.

Точная оценка многочисленных негативных эффектов выходит за рамки данной работы. Количественная оценка и сглаживание таких эффектов являются предметом текущих исследований. Настоящие эксперименты демонстрируют первое успешное использование сигналов наземной навигации для наблюдения за объектами гражданской авиации (в данном случае — пассажирским самолетом) с помощью пассивного радара.

Заключение

Исследованы структурные свойства сигналов американской радиолокационной системы NextNav. Теоретическое исследование основано на доплеровском эффекте. Возможность применения маячковых сигналов навигационной системы NextNav подтверждена проведением успешного эксперимента в реальных условиях. Наземные навигационные сигналы обладают рядом уникальных свойств, дающих преимущества при использовании совместно с пассивными радаром [13]. Передачи очень точно рассчитаны по времени, передатчики синхронизированы, а содержимое сигнала почти полностью известно (имеет место очень низкая скорость передачи данных). Подтвердив возможность применения этих сигналов, можно проводить дальнейшую работу по изучению и использованию их свойств в будущем с помощью новейших разработок в сфере IoT ("Интернета вещей").

ЛИТЕРАТУРА

1. Разжигина Ю. Р., Черноволенико А. И. Основы радиолокации в современном мире // Молодой ученый. 2017. № 17(151). С. 75—78. <https://moluch.ru/archive/151/42770/>
2. Амиров А.Ж., Когай Г. Д., Тен Т. Л., Хамзина М. С. Анализ существующих современных радионавигационных систем // Молодой ученый. 2015. № 21(101). С. 120—122. <https://moluch.ru/archive/101/22791/>
3. Rafter M. V. Transportation Officials Seek Alternative Tech for GPS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://spectrum.ieee.org/aerospace/satellites/us-transportation-officials-seek-alternative-tech-for-gps>
4. Elevating Geolocation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nextnav.com/>
5. Nomikos P., Economou D., Limnaios G., Zikidis K. C. Presentation and feasibility study of passive radars // Air Force Rev. Mag. (in Greek). 2016. № 107. P. 86—103.
6. Зубарев В. Ю., Пономаренко Б. В., Шанин Е. Г., Вострецов А. Г. Построение минимаксных ансамблей аperiодических кодов Голда // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 2. С. 26—37. <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-minimaksnyh-ansambley-aperiodicheskikh-kodov-golda>

7. **Нгуен В. К., Маркелова М. А., Веремьев В. И.** Анализ возможности использования спутниковых сигналов подсвета для пассивной радиолокационной системы // Вестник НовГУ. 2019. № 4(116). С. 86—91. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vozmozhnosti-ispolzovaniya-sputnikovyh-signalov-podsveta-dlya-passivnoy-radiolokatsionnoy-sistemy>
8. **Oikonomou D., Nomikos P., Limnaios G., Zikidis K.** Passive Radars and their use in the Modern Battlefield. 2019. № 9. P. 37—61.
9. **Salem Salaheldin.** Passive Radar Systems // Department of Collage of Communication and Networking Engineering. 2019. № 4. P. 8—16.
10. **Кучерявенко А. В.** Подавление турбинного эффекта радиолокационного сигнала в импульсно-доплеровской РЛС // ИВД. 2017. № 4(47). <https://cyberleninka.ru/article/n/podavlenie-turbinnogo-effekta-radiolokatsionnogo-signalov-v-impulsno-doplerovskoy-rls>
11. **Fedosov V. P., Lomakina A. V., Legin A. A., Voronin V. V.** Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels: Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering Architectures, Algorithms, and Applications. — Baltimore: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2016. P. 98720G.
12. **Jiayu Z., Shilie Z.** Analysis of rotational Doppler effect based on radio waves carrying orbital angular momentum // J. Applied Physics. 2018. № 124. P. 164907. <https://doi.org/10.1063/1.5050448>
13. **Вахрушева А. А.** Актуальные принципы наземной навигации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. № 1. <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-printipy-nazemnoy-navigatsii>

USING SIGNALS FROM THE NEXTNAV RADIO NAVIGATION SYSTEM

V. V. Kabakov

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

This article explores for the first time the use of NextNav ground positioning system signals to work together with passive radars on an urban scale. The article presents a brief theoretical analysis describing the effectiveness of ground navigation signals using the example of the American NextNav system. In the experimental part, it was investigated that using a passive radar system, which uses ground positioning transmission in a bistatic range of 10 km, it is possible to observe civil aviation objects (for example, a passenger aircraft).

Keywords: passive radar, NextNav radio navigation system, ground navigation, Gold codes, Doppler effect.

Bibliography — 13 references.

Received April 2, 2021

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России: Межотр. науч.-техн. журнал / Федеральное государственное унитарное предприятие «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2021. Вып. 2. С. 1—64.

Редактор *О. А. Константинова*

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

Подписано в печать 19.05.2021.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,4. Уч.-изд. л. 7,7.

Тираж 250 экз. Заказ 1972.

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, офис 105.

ИП Кириченко Алексей Викторович.

Индекс 79379.