

ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС — научно-техническому прогрессу России



- МАШИНОСТРОЕНИЕ



- ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКОЕ
ПРОИЗВОДСТВО

- СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ
И ИЗМЕРЕНИЯ



2'2020



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 образования и науки 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: secretariat@ntckompas.ru

2 ОБОРОННЫЙ (146) КОМПЛЕКС - научно-техническому прогрессу России

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1984 г.

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Шовкалюк А. П. Интерфейс JTAG. Сравнение программаторов JTAG..... 3

Пителинский К. В., Тихомиров А. О. Широков А. А. О направлениях развития информационных технологий для цифровой экономики РФ..... 5

МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Карнута Д. С. Применение аддитивных технологий на современном этапе развития машиностроения..... 13

Спирягин В. В. Оценка эффективности методики технического диагностирования металлоконструкций испарителей холодильных машин с учетом локальной деформации труб трубного пучка..... 20

Овчинников Н. А., Григорьев Б. А. Плотность авиационных масел при повышенных давлениях..... 26

ИЗМЕРЕНИЯ. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Арсеньев В. Н., Дубинин Д. П. Обоснование метода оценивания характеристик сложных

систем при ограниченном числе натурных испытаний..... 30

Дрогозов П. А., Иващенко О. Б. Механизмы совершенствования высокотехнологичного производства на основе производственной системы "Росатом"..... 37

Усатенко Т. О. Синтез облика образца вооружения и военной техники на этапах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ..... 43

Дьячков М. Е., Кобелев П. А., Шевченко Р. В. Оперативно-производственное планирование производственного процесса сервисного обслуживания вооружения и военной техники ПВО..... 46

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

Шильцин А. В., Марков Д. В., Латышев К. В., Петленко Д. Б. Моделирование электрооптических повторителей субнаносекундных импульсов с обратной задержанной связью и дробным мультиплексированием..... 51

Жиленков А. А., Черный С. Г. Применение технологий искусственного интеллекта в автоматизации контроля и управления в системах активных фазированных решёток для геоинформационного комплекса..... 57

Главный редактор

И. А. Шеремет, 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. Коптев**, 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 004.42

ИНТЕРФЕЙС JTAG. СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММАТОРОВ JTAG

А. П. Шовкалюк, канд. техн. наук

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

Показано, что применение интерфейса JTAG является одним из наиболее популярных способов при проведении работ по диагностике устройств. Существует огромное количество отечественных программаторов, что позволяет констатировать достаточно высокую степень развития отечественной радиоэлектроники при рассмотрении вопросов программирования с помощью интерфейса JTAG.

Ключевые слова: JTAG, программатор, сравнение, интерфейс, характеристика.

Допустим, что у разработчика имеется устройство и его задачей является получение полного доступа к нему. Так как обычно у разработчика есть полный физический доступ к исследуемому изделию, у него может возникнуть идея провести прямую атаку на аппаратную часть устройства. Однако если разработчик не обладает необходимым уровнем квалификации и, соответственно, нужным набором знаний по данной тематике, это может послужить причиной возникновения сомнительных ситуаций и различных вопросов.

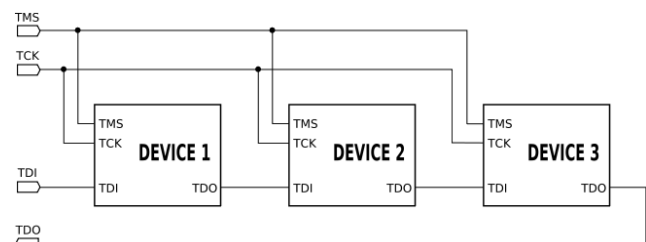
Одним из наиболее перспективных способов проведения диагностики оборудования является применение интерфейса JTAG. Данный интерфейс весьма распространен, поэтому достаточно актуальны вопросы, которые касаются систематизации первичных данных о самом интерфейсе, а также проведения сравнения отечественных программаторов, работающих с данным интерфейсом.

Описание интерфейса JTAG

Интерфейс JTAG — один из наиболее распространенных протоколов, который может быть использован для установления прямой связи произвольного устройства, поддерживающего данный протокол обмена, с компьютером, также поддерживающим данный интерфейс. Данный протокол был создан в 1980 г. фирмой Joint Test Access Group по причине того, что ежегодно наблюдалось увеличение сложности методов, которые использовали при проведении тестирования печатных плат. Практически сразу данный

интерфейс стал набирать широкую популярность в кругах разработчиков и отладчиков оборудования. Интенсивно этому поспособствовало включение данного интерфейса в архитектуру работы процессоров фирмы Intel в 1990 г. (к примеру, таких, как 80486). После включения данного протокола в процессоры он стал полностью соответствовать такому международному стандарту, как IEEE 1491. Данный интерфейс применяют для проведения операций программирования, наладки и тестирования большинства разрабатываемых устройств [1].

Рассматриваемый интерфейс дает возможность разработчику конкретного устройства проводить операцию тестирования физических каналов связи между выводами на микросхеме. В тех ситуациях, когда разработчик говорит о применении интерфейса в целях отладки печатной платы, он подразумевает под этой процедурой не простую отладку работоспособности конечного приложения. Имеется в виду, что он производит проверку конкретного вывода микросхемы на корректность физического соединения с другим выводом у другой микросхемы. Так как интерфейс JTAG позволяет разработчику получить прямой доступ к аппаратной части печатной платы, использование этого интерфейса позволяет исследовать безопасность работы устройства с высокой эффективностью. На рисунке показана наиболее популярная и, фактически, основная схема JTAG.



Базовая схема JTAG [2]

Шовкалюк Алексей Петрович, доцент кафедры.
E-mail: shovalex@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27 января 2020 г.

© Шовкалюк А. П., 2020

В таблице приведена сравнительная характеристика программаторов JTAG.

Сравнение программаторов JTAG

Возможности JTAG	Программатор					
	USB-P v2.0	USB-SPI v2.0	CPLD EJTAG v2.0	USB-F v1.1	USB-F 2.0 (1.2)	USB-F v3.0
Ограничения	RTCK, скорость JTAG	RTCK, ско- рость JTAG	LPT-порт	—	—	—
I ² C-интерфейс	HW	HW	SW	SW	HW	SW
SPI-интерфейс	HW	HW	HW	HW	HW	HW
Максимальный TCK, МГц	1—3	1—3	20	12	24	24
Кол-во скоростей TCK	1	1	4	8	16	16
Максимально достигаемая скорость чтения флеш, кБ/с	40	40	100	350	600	500
Выходные уровни сигналов JTAG, В	1,8—3,3	1,8—3,3	2,6/3,3	3,3	1,8—3,3	1,8—3,3
"Мозг" устройства	C8051F342	C8051F342	EPM240	PIC32MX440 +XCS05XL	PIC32MX575 +EPM240	ATSAM3U +EPM240
Дополнительные возмож- ности	SW UART 9600-57600	HW UART 9600-256000	—	—	-	HW UART 9600-115200 Direct-ISP
Цена (на конец 2019 г.), долл.	75	50	—	80	115	165

Стоит отметить, что JTAG не является:

- специфическим устройством для отладки прошивки и аппаратной части;
- приложением для отладки кода на устройстве;
- протоколом;
- коннектором [2].

Заключение

Применение JTAG приводит к существенно-му увеличению конечной стоимости готового устройства, а также усложнению его проектирования и создания. Однако в конечном итоге указанные недостатки достаточно легко окупаются за счет упрощения процедуры тестирования устройства, которую осуществляют на всех жиз-

ненных этапах изготовления изделия. Помимо этого разработчики оборудования могут применять интерфейс JTAG для того, чтобы проводить самостоятельное тестирование элементов, перезагружать данные в регистры используемых микросхем или "заливать" прошивки в микроконтроллеры, сигнальные процессоры или программируемые логические интегральные схемы. Тестовые программы, созданные на этапе отладки изделия в целях его проверки, могут быть использованы в дальнейшем при проведении операции выходного контроля.

К числу главных преимуществ использования интерфейса JTAG относят:

- снижение временных затрат на проведение испытаний изделий;
- расширенный диапазон проверок, которые позволяют выявить ошибки.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE 1149.1 (JTAG) Boundary-Scan Testing. — США: Корпорация "Альтера", 2005. — 44 с.
2. JTAG на службе специалиста по безопасности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/analytics/485268.php> (дата обращения: 26.12.2019).

JTAG INTERFACE. COMPARISON OF JTAG PROGRAMMERS

A. P. Shovkaluk

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

Shown that the JTAG interface is one of the most popular in conducting work on device diagnostics. It is noted that currently there is a huge number of domestic programmers, which allows us to say about a fairly high degree of development of domestic radio electronics in programming using the JTAG interface.

Keywords: JTAG, programmer, comparison, interface, characteristic.

Bibliography — 2 references.

Received January 27, 2020

УДК 004:338:304

О НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ РФ

К. В. Пителинский, канд. техн. наук; А. О. Тихомиров; А. А. Широков
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

Рассмотрена актуальная проблематика — роль информационных технологий в цифровизации экономики, а также их развитие в РФ. Проведен анализ хода реализации планов развития цифровой экономики в РФ (на примере сравнения с зарубежными странами). Результатом является изучение существующих и уже утвержденных программ в области информатизации, выявление возможных препятствий и предложение вариантов их устранения.

Ключевые слова: информационные технологии, цифровая экономика, инновационные программы, точки роста, перспективы развития.

В конце XX в. человечество вступило в эпоху интенсивного развития, характеризуемого повышенным уровнем распространения (обмена), накопления, хранения и использования информации. Становится очевидно, что информация — такой же продукт (и такая же услуга), как и "классические" (материальные) товары, средства производства и предметы труда (в рамках концепции трехсекторной экономики В. А. Колмаева). Отсюда следует, что к ним применимы как принципы поощрения конкуренции за товары и услуги на рынке, так и концепция жизненного цикла товара (услуги). Информация, как и любой продукт, должна быть ориентирована на целевую группу потребителей и в будущем должна стать легко интегрируемой (в целях ее последующей обработки и передачи) с другими инновационными и информационными технологиями на глобальном уровне, чтобы комплексно охватить все социально-экономическое пространство.

Исходя из этого власть-имущими делается попытка донести определенные политкорректные (средние) вкусы до максимально широкой аудитории, одновременно минимизируя требования к уровню интеллектуального развития потребителей информации. Такая унификация мышления и вкуса очень полезна для построения нового мирового порядка, который, как предпо-

лагают, будет основан на глобализации, разделении труда и на сокращении разрыва в качестве жизни между "золотым миллиардом" и другими жителями Земли. На рис. 1 показана двойственная (полярная) структура теории управления и ее триадическая сущность в контексте программно-ориентированного управления процессом продвижения социально-экономических отношений по спирали Бусыгина—Маслоу, которая постепенно разворачивается в пространстве-времени [1].



Рис. 1. Триада управления социально-экономическими системами [1]

В доиндустриальном обществе главенствовали природные и трудовые ресурсы, в индустриальном — материальные, а постиндустриальном главенствуют интеллектуальные и информационные ресурсы. Технологическая революция с ядерными информационно-коммуникационными технологиями формирует обновленный материальный базис общества и его производственной техносферы. В складывающейся информационной экономике (экономике знаний) акселератором ее эффективности являются тех-

Пителинский Кирилл Владимирович, доцент кафедры "Информационная безопасность".

E-mail: yekadath@gmail.com

Тихомиров Александр Олегович, студент кафедры "Информационная безопасность".

E-mail: alectikhomirov47@gmail.com

Широков Анатолий Александрович, студент кафедры "Информационная безопасность".

E-mail: minisoto@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2019 г.

© Пителинский К. В., Тихомиров А. О., Широков А. А., 2020

нологии создания знаний и их творцы — "знайки". Термины "информационная экономика" и "информационное общество" появились в 60-х гг. XX в. и стали общепризнанными для сложившейся реальности развитых стран, поскольку информация и знания — критически важные элементы всех экономических систем (процесс производства всегда основан на технологиях обработки информации и создания знаний).

В работах Э. Тоффлера предложена волновая парадигма развития общества, для которой выделены три последовательные стадии развития человеческого общества: аграрная, индустриальная и постиндустриальная (табл. 1) [2].

Таблица 1

Три стадии развития человеческого общества

Стадия	Содержание
Аграрная	Характеризуется добывающими видами хозяйственной деятельности (добыча полезных ископаемых, земледелие, рыболовство). Подавляющее большинство населения занято в сельском хозяйстве. Главная задача — прокормить население и дать ему средства к существованию. История аграрного производства насчитывает тысячи лет. На этой стадии развития находится большинство стран Африки, некоторые в Латинской Америке и Юго-Восточной Азии
Индустриальная	Производственная индустрия возникла в результате промышленной революции после внедрения паровой машины в добывающую среду, промышленность, сельское хозяйство и транспорт. Основная масса работников — фабрично-заводские рабочие. Задача — обеспечить потребности населения в доступных и качественных товарах. Началась в Англии в 60-х годах XVIII в. и завершилась в США и в Западной Европе в 50–60-е годы XX в.
Постиндустриальная	Возникла в конце XX в. Характеризуется развитием производства различных услуг (связанных с накоплением и распространением знаний). Обеспечение продовольствием и товарами ушло на второй план. Техника производства усложнилась, что вызвало потребность в высококвалифицированных кадрах. Выросла ценность научного знания, распространяемого густой сетью мобильных коммуникаций. Появился средний класс "знаек" — работников умственного труда, занимающих важные позиции в обществе

Обычно выделяют технологии трех основных типов:

- инвестиционно-управляющие, обусловленные способами концентрации различных ресурсов;

- институциональные, связанные с формированием организационных структур при использовании инвестиционных и предметных технологий;

- предметные, связанные с трансмутацией людей или веществ (каждой группе технологий данного типа соответствуют свои институциональные и инвестиционно-управляющие технологии).

Большинство технологий развивается по законам, сходным с законами биологической эволюции, но в редчайших случаях так называемые закрывающие технологии могут глубоко и непредсказуемо переменить социоэкономические отношения. Технологическим пакетом называют взаимосвязанную и взаимодействующую совокупность технологий, позволяющих получить конечный продукт, удовлетворяющий какую-либо потребность. Каждый технологический пакет имеет свою замыкающую технологию — технологию, интегрирующую разнородные технологии воедино и создающую с их помощью продукт, удовлетворяющий какую-либо потребность. Замыкающая технология тем значимее, чем более важен для социоэкономической системы конкретный технологический пакет. Закрывающие технологии — технологические пакеты, позволяющие удовлетворить различные потребности значительно эффективнее (во всех отношениях), чем это позволяют наличные технологические пакеты.

Данные технологии разрушают сложившийся технологический уклад, отчего они никому (кроме их конечных потребителей) категорически не нужны, поскольку девальвируют сложившуюся структуру капитала (начиная от основных производственных фондов и заканчивая умениями и навыками персонала), что влечет турбулентные изменения в экономике, а затем и в политике. Закрывающие технологии являются двойными технологиями, т. к. помимо своего явного назначения удовлетворять какие-либо потребности они являются мощным оружием нового поколения, основанным на главном приоритете теории управления — методологии [3].

Федеральные целевые программы цифровизации

Цифровая экономика — практическая деятельность, непосредственно связанная с развитием цифровых технологий, в которую входят сервисы по предоставлению онлайн-услуг, электронные платежи, интернет-торговля, краудфандинг и т. д. Обычно главными элементами цифровой экономики называют электронную ком-

мерцию, интернет-банкинг, электронные платежи, интернет-рекламу, а также интернет-игры.

В целях развития цифровой экономики распоряжением правительства РФ от 28 июля 2017 г.

№ 1632-р утверждена программа "Цифровая экономика РФ" на 2018—2024 гг. [4]. В табл. 2 приведены состав и сроки реализации каждого проекта.

Таблица 2

Цели программы "Цифровая экономика"

Программы	Сроки выполнения	Актуальность
Разработка и реализация дорожных карт развития перспективных "сквозных" цифровых технологий		
Утверждены дорожные карты развития перспективных "сквозных" технологий (субтехнологий) с учетом потребностей ведущих компаний в области цифровой экономики	30 июня 2019 г.	Выполнено
Определены принципы отбора и меры поддержки лидирующих исследовательских центров в рамках реализации дорожных карт развития "сквозных" цифровых технологий, в том числе правила взаимодействия организаций, входящих в лидирующие исследовательские центры	30 июня 2019 г.	Выполнено
Определены не менее 9 лидирующих исследовательских центров по "сквозным" технологиям в области цифровой экономики	31 декабря 2019 г.	Выполнено
Реализуется не менее 50 исследовательских проектов с участием лидирующих исследовательских центров в рамках реализации дорожных карт по направлениям "сквозных" цифровых технологий, в том числе в интересах российских компаний-лидеров	31 декабря 2020 г.	Реализуется
Определены не менее 18 лидирующих исследовательских центров по направлениям развития "сквозных" цифровых технологий	31 декабря 2020 г.	Реализуется
Создание цифровых платформ для реализации исследований и разработок по направлениям "сквозных" цифровых технологий		
Созданы прототипы не менее 2 пилотных цифровых платформ для исследований и разработок и использования результатов интеллектуальной деятельности	31 декабря 2019 г.	Выполнено
Созданы цифровые платформы исследований и разработок, а также использования результатов интеллектуальной деятельности на базе лидирующих исследовательских центров и компаний-лидеров по направлениям "сквозных" цифровых технологий (не менее 2)	31 декабря 2020 г.	Реализуется
Поддержка российских высокотехнологичных компаний-лидеров, разрабатывающих продукты, сервисы и платформенные решения на базе "сквозных" цифровых технологий для цифровой трансформации приоритетных отраслей экономики и социальной сферы преимущественно на основе отечественных разработок		
Определены требования к отбору компаний-лидеров, разрабатывающих продукты и платформенные решения преимущественно на основе российских технологий и решения для цифровой трансформации приоритетных отраслей экономики и социальной сферы преимущественно на основе отечественных разработок	30 июня 2019 г.	Выполнено
Принят комплекс мер, обеспечивающих преференции компаниям-лидерам, разрабатывающим продукты, сервисы и платформенные решения на базе "сквозных" технологий, в том числе ведущим совместные разработки с лидирующими исследовательскими центрами	30 сентября 2019 г.	Выполнено
Отобраны в целях осуществления поддержки компании-лидеры, разрабатывающие и обеспечивающие внедрение продуктов, сервисов и платформенных решений преимущественно на основе российских технологий и решений для цифровой трансформации приоритетных отраслей экономики и социальной сферы (первая очередь отбора)	31 декабря 2019 г.	Выполнено
Отобраны в целях осуществления поддержки компании-лидеры, разрабатывающие и обеспечивающие внедрение продуктов, сервисов и платформенных решений преимущественно на основе российских технологий и решений для цифровой трансформации приоритетных отраслей экономики и социальной сферы (вторая очередь отбора)	31 декабря 2020 г.	Реализуется
Компании-лидеры реализуют портфель проектов по разработке продуктов и сервисов, в том числе платформенных решений на базе "сквозных" цифровых технологий, с общим объемом финансирования не менее 10 млрд руб., в том числе в рамках реализации дорожных карт по направлениям развития "сквозных" цифровых технологий	31 декабря 2020 г.	Реализуется
Формирование спроса на передовые российские цифровые технологии, продукты и платформенные решения		
Утверждены рекомендации по цифровой трансформации государственных корпораций и компаний с государственным участием	31 мая 2019 г.	Выполнено
Утвержден комплекс мероприятий по стимулированию создания и реализации программ и проектов по цифровой трансформации организаций с применением "сквозных" цифровых технологий	30 июня 2019 г.	Выполнено

Программы	Сроки выполнения	Актуальность
Формирование спроса на передовые российские цифровые технологии, продукты и платформенные решения		
Внесены изменения в нормативные правовые акты, определяющие деятельность институтов инновационного развития, в целях обеспечения приоритетной поддержки проектов по внедрению "сквозных" цифровых технологий	30 июня 2019 г.	Выполнено
Утверждены не менее 10 стратегий цифровой трансформации государственных корпораций и компаний с государственным участием, создающих спрос на "сквозные" технологии	31 декабря 2019 г.	Выполнено
Назначены не менее 10 заместителей высших должностных лиц в государственных корпорациях и компаниях с государственным участием, реализующих стратегии цифровой трансформации, наделенных полномочиями и обеспеченных ресурсами для реализации инициатив и проектов в рамках осуществления указанных стратегий	31 декабря 2019 г.	Выполнено
Назначены не менее 20 заместителей высших должностных лиц в государственных корпорациях и компаниях с государственным участием, реализующих стратегии цифровой трансформации, наделенных полномочиями и обеспеченных ресурсами для реализации инициатив и проектов в рамках осуществления указанных стратегий	30 июня 2020 г.	Реализуется
Проведено обучение руководящего состава государственных корпораций и компаний с государственным участием по программам управления разработкой и использования "сквозных" цифровых технологий в целях повышения конкурентоспособности и бизнеса	31 декабря 2020 г.	Реализуется
Утверждены не менее 20 стратегий цифровой трансформации государственных корпораций и компаний с государственным участием	31 декабря 2020 г.	Реализуется
Утверждены не менее 30 стратегий цифровой трансформации государственных корпораций и компаний с государственным участием	30 июня 2021 г.	Реализуется
Назначены не менее 30 заместителей высших должностных лиц в государственных корпорациях и компаниях с государственным участием, реализующих стратегии цифровой трансформации, наделенных полномочиями и обеспеченных ресурсами для реализации инициатив и проектов в рамках осуществления указанных стратегий	30 июня 2021 г.	Реализуется

На данную программу выделено около 403 млрд руб. При этом на сами цифровые технологии предусмотрено только 88,5 млрд руб. [5].

Однако 24 декабря 2018 г. был утвержден паспорт национальной программы "Цифровая экономика РФ", разработанной Минкомсвязи РФ (Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации) во исполнение Указа Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 "О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года", который включает в себя шесть федеральных программ: "Нормативное регулирование цифровой среды", "Информационная инфраструктура", "Кадры для цифровой экономики", "Информационная безопасность", "Цифровые технологии и проекты" и "Цифровое государственное управление" [6].

Целью федеральной программы "Цифровые технологии и проекты" является создание "сквозных" цифровых технологий (преимущественно на основе отечественных разработок). Для реализации данной программы из-за ее ресурсоемкости необходимо много времени, но правительство требует выполнения своих планов в кратчайшие сроки (до 2021 г.). Что касается процесса финансирования, то еще в 2017 г. считалось, что на реализацию программы "Цифровая экономика РФ" потребуется примерно 100 млрд руб. в год.

В начале 2018 г. на развитие цифровой экономики РФ правительство выделило 3 млрд руб. Хотя бюджет программы "Цифровая экономика РФ" был оценен в 3,5 трлн руб., на программу "Цифровые технологии и проекты" выделено лишь 195 млрд руб. В дальнейшем бюджет многократно изменяли. В итоге на программу "Цифровые технологии и проекты" будет выделено всего 1,4 трлн руб.

Далее ситуация усугубилась, поскольку в 2019 г. произошло очередное сокращение финансирования данной программы, причем более чем в 2 раза. Теперь ее бюджет составляет 1,634 трлн руб. Из этой суммы 1,1 трлн руб. должен выделить федеральный бюджет, а 534 млрд руб. должны быть взяты из внебюджетных источников. Также значительно сокращены расходы на федеральную программу "Цифровые технологии и проекты" (до 451,8 млрд руб.). Расходы по остальным федеральным программам остались на уровне, заложенном в прежний вариант национальной программы. На программу "Информационная инфраструктура" предполагается потратить 772 млрд руб., на программу "Кадры для цифровой экономики" — 143 млрд руб., на программу "Информационная безопасность" — 30 млрд руб., на программу "Нормативное регулирование цифровой среды" — 1,7 млрд руб. (т. е. выделенного бюджета будет явно недостаточно).

Для сравнения с текущим положением дел в РФ возьмем отдельные зарубежные компании экономически развитых стран. К 17 января 2019 г. стали известны статистические данные о компаниях с наибольшими расходами на информационные технологии (оборудование, программное обеспечение, услуги) за 2018 г. Данные для газеты "The Wall Street Journal" предоставили аналитики International Data Corp (IDC). Из рис. 2 видно, что лидером по ИТ-бюджетам по итогам 2018 г. стала компания Amazon с результатом в 13,6 млрд долл. (примерно 884 млрд руб.). В тройку бизнес-лидеров вошли материнский для Google холдинг Alphabet и ритейлер Walmart с близкими технологическими затратами на уровне 12 млрд долл. (примерно 780 млрд руб.) [7].

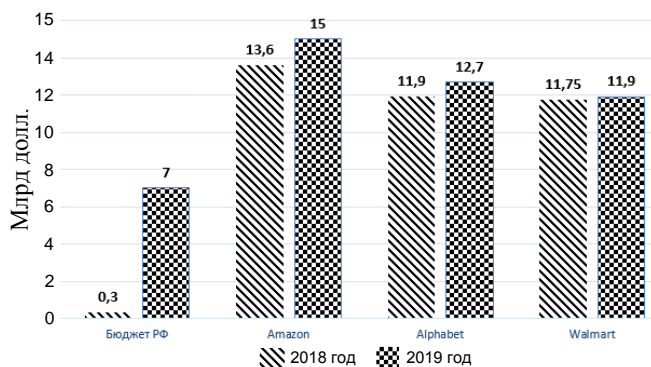


Рис. 2. Сравнение бюджетов компаний на ИТ-технологии в млрд долл.

Приведенные в качестве примера корпорации вкладывают значительную часть своего бюджета в передовые информационные технологии (поскольку они постоянно страдают от хакерских атак). Затрачиваемые ИТ-гигантами в год суммы сопоставимы по объему с выделенными РФ средствами на выполнение целой федеральной программы. С учетом специфики экономики РФ можно сделать предположение о том, что к моменту реализации плана развития цифровой экономики РФ на практике его актуальность может быть утеряна.

Возможные точки роста цифровой экономики РФ

Одним из решений поставленной проблемы может быть концентрация внимания и средств на точках инновационного роста [8]. Можно сделать вывод, что из всего приведенного на рис. 3 списка технологий стоит особо отметить робототехнику и новые производственные технологии как наиболее перспективные для применения в условиях РФ.

Технология	Состав технологии
Большие данные 	Интеллектуальный анализ данных; Базы данных с массовой параллельной обработкой; Облачные сервисы высокопроизводительных и других вычислений с большими данными; Распределенные файловые системы
Нейротехнологии и искусственный интеллект 	Компьютерное зрение; Обработка естественного языка; Распознавание и синтез речи; Рекомендательные системы и интеллектуальные системы поддержки принятия решений; Перспективные методы и технологии в искусственном интеллекте; Нейропротезирование; Нейроинтерфейсы, нейростимуляция и нейросенсинг
Система распределенного реестра (блокчейн) 	Технологии обеспечения целостности и непротиворечивости данных (консенсус); Технологии создания и исполнения децентрализованных приложений и смарт-контрактов; Технологии организации и синхронизации данных
Квантовые технологии 	Квантовые коммуникации; Квантовые сенсоры и метрология; Квантовые вычисления
Новые производственные технологии 	Цифровое проектирование, математическое моделирование и управление жизненным циклом изделия или продукции (Smart Design); Технологии "умного" производства (Smart Manufacturing); Манипуляторы и технологии манипулирования
Робототехника и сенсорика 	Сенсоры и цифровые компоненты РТК для человеко-машинного взаимодействия; Технологии сенсорно-моторной координации и пространственного позиционирования сенсоры и обработка сенсорной информации
Беспроводная связь 	5G (мобильная связь пятого поколения); LTE (Long-Term Evolution); LoRaWAN (Low-power Wide-area Network); NB-IoT (Narrow Band Internet of Things); NB-Fi (открытый протокол беспроводной передачи данных малого объема на больших расстояниях при низких затратах энергии LPWAN)
Виртуальная и дополненная реальность 	Средства разработки VR/AR-контента (дополненная реальность и виртуальная реальность) и технологии совершенствования пользовательского опыта (UX) со стороны разработчика; Платформенные решения для пользователей: редакторы создания контента и его дистрибуции; Технологии захвата движений в VR/AR и фотограмметрии; Интерфейсы обратной связи и сенсоры для VR/AR; Технологии графического вывода; Технологии оптимизации передачи данных для VR/AR
Компьютеры будущего 	Молекулярные компьютеры; Биокomпьютеры; Оптические компьютеры; Квантовые компьютеры

Рис. 3. "Сквозные технологии" и их состав

Например (в теории), развитие робототехники позволит автоматизировать большинство технологических операций, выполняемых вручную, что позволит сэкономить ресурсы и повысить качество выпускаемых товаров и предоставляемых услуг. Сейчас РФ имеет определенные достижения в сфере автоматизации бизнес-процессов, но на фоне быстрого роста экономики других государств (Китай или США) необходимы или новые реализующие управление методологические подходы, или большее число квалифицированных работников. Поэтому вкладываться нужно как в НИОКР, так и в переобучение квалифицированных работников. Новые производственные технологии позволяют использовать иные подходы к решению управленческих и производственных задач, поскольку цель формирования конкурентоспособных предприятий и организаций — создание интеллектуального капитала (ИК) компании и последующее ее интенсивное развитие (в противовес экстенсивному развитию), которое показано на рис. 4.



Рис. 4. Области и способы формирования интеллектуального капитала компании

"Менеджмент знаний (управление знаниями) — дисциплинарный подход к достижению поставленных перед организацией целей путем оптимального использования знаний" (ГОСТ Р 53894, 2016). Другими словами, управление знаниями (УЗ) — циклические системные процессы, с помощью которых создают, сохраняют, распределяют и применяют главные элементы интеллектуального капитала (т. е. знания, навыки и производственный опыт конкретных людей и нематериальные активы (интеллектуальный капитал), в которые входят патенты, базы данных, программное обеспечение, товарные знаки и т. д., производительно используемые для получения экономических, технических и иных результатов). С помощью грамотного управления ИК удастся создать необходимые условия для непрерывности реализуемых организацией бизнес-процессов. Следовательно, УЗ-стратегия, трансформирующая все виды интеллектуальных активов и обеспечивающая высокую производитель-

ность, эффективность и новую стоимость организации (предприятия).

Система управления знаниями (СУЗ) как нелинейное (взаимопроникающее) объединение людей, процессов и технологий, обеспечивающее конкурентоспособность организации, показана на рис. 5 [9].



Рис. 5. Элементы системы управления знаниями

Адаптация программы "Цифровая экономика" к реалиям РФ

Возможным решением отмеченной проблемы может стать увеличение срока выполнения программы "Цифровая экономика" и ей подобных. Это позволит основательнее подойти к разработке и адаптации технологий к условиям РФ. В рамках федеральной программы "Цифровые технологии" внимание сконцентрировано на развитии 5G-сети и на широкополосном Интернете. К 2020 г. в РФ планируется покрыть сетями связи (с возможностью беспроводной передачи данных) все федеральные автомобильные дороги, а к 2024 г. широкополосный доступ к сети Интернет будут иметь 97 % домашних хозяйств и все лечебно-профилактические учреждения (если учреждения находятся в городах с уже развитыми сетевыми технологиями) [10].

В частности, летом 2018 г. В. В. Путин поручил правительству РФ рассмотреть вопрос о создании точек доступа в Интернет в селах с численностью населения от 100 человек [11]. 14 октября 2019 г. корпорация "Ростелеком-Юг" сообщила, что обеспечен бесплатный доступ к Интернету для жителей 136 населенных пунктов Ставропольского края, включенных в программу "Устранение цифрового неравенства" (УЦН). Строительство последних 22 точек доступа Wi-Fi завершено в Шпаковском и Кочубеевском районах раньше запланированного срока. Для реализации программы специалисты компании проложили 1375 км оптоволокна в 26 муниципальных районах региона. При строительстве точек до-

ступа в рамках УЦН использовано исключительно отечественное оборудование.

Однако здесь есть определенные трудности. Например, Министерство обороны РФ отказывается передавать операторам частоты для 5G. Причиной тому является отсутствие коммерческого оборудования под диапазон 4,8–4,99 ГГц. Диапазон 27,1–27,5 ГГц годится только для локального покрытия абонентов сети, а диапазон 3,4–3,8 ГГц, для которого уже есть оборудование, занят связью военного назначения. Для решения этой проблемы без конверсии (т. е. передачи гражданским компаниям права на использование частот) не обойтись.

Очевидно, что запланированный объем работ требует значительно больше времени, чем пять лет (в предположении заинтересованности РФ как государства в гармоническом развитии каждой сферы своей социально-экономической жизни).

Для увеличения объема бюджета инновационных проектов РФ частные компании занимаются венчурными инвестициями (которые являются особой разновидностью прямых инвестиций). Венчурные фонды вкладывают деньги в проекты, находящиеся на ранних стадиях развития, но обещающие быстро расти. Однако здесь существует значительный риск потерять вложенные в проекты деньги. На рис. 6 показано, что в первом полугодии 2019 г. основной объем средств в 136,6 млн долл. привлек подсектор электронной коммерции РФ, заняв 62 % от общего объема инвестиций. Второе место в первом полугодии 2019 г. занял подсектор решений по автоматизации для бизнеса (14,6 млн долл., 7 % от общего объема), третье место — подсектор прочих сервисов и услуг (11,5 млн долл., 5 % от общего рынка) [12]. Российский рынок электронной коммерции в первой половине 2019 г. вырос на 26 %, достигнув отметки в 11,4 млрд долл. (по данным аналитиков из Data Insight). За это время россияне сделали 191 млн заказов (для сравнения, столько заказов было сделано за весь 2016 г.). Число интернет-покупок в РФ за январь—июнь 2019 г. увеличилось на 44 %, что составляет рекорд за все время наблюдений. Российские эксперты считают, что точками такого роста выступили крупнейшие онлайн-магазины [13]. Переход населения на электронную коммерцию является еще одной важной причиной увеличения бюджета программы "Цифровая экономика РФ".

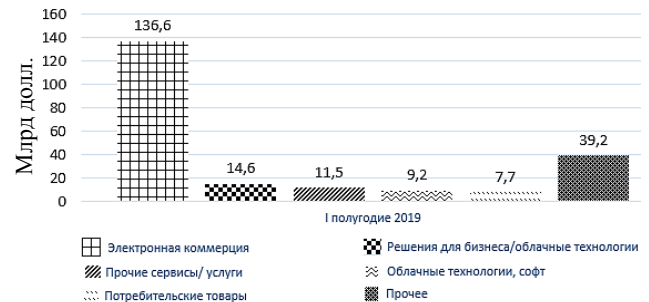


Рис. 6. Объемы венчурных инвестиций по секторам экономики РФ

Заключение

Представляется сомнительным, что РФ сможет осуществить свои амбициозные планы цифровизации экономики в установленные сроки, поскольку это зависит от множества не поддающихся контролю и компенсации факторов (например, таких, как отсутствие отечественной современной элементной базы, влияние секторальных санкций Запада, низкая культура производства и т. д.). Реализация данного плана возможна лишь при корректной реакции государства на возможные проявляющиеся факторы. Для успешной реализации программы "Цифровая экономика РФ" должен быть значительно увеличен объем финансирования федерального проекта "Цифровые технологии и проекты", кроме того, для более тщательного подхода к разработкам и внедрению инструментов цифровой экономики в повседневную жизнь необходимо увеличить сроки его выполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пителинский К. В.** Социоэкономические аспекты управления — архаизация общества через его виртуализацию // Вестник Московского института лингвистики. 2014. № 2/2013—1/2014. С. 106—111. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsioekonomicheskie-aspekty-upravleniya-arhaizatsiya-obschestva-cherez-ego-virtualizatsiyu> (дата обращения: 05.10.2019).
2. Закрывающие технологии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://evan-gcrm.livejournal.com/930193.html> (дата обращения: 10.10.2019).
3. **Пителинский К. В.** Цифровое средневековье, Интернет вещей и 3D-технологии // Вестник Московской международной академии. 2017. № 2/2016—1/2017. С. 264—269. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoye-srednevekovie-internet-veschey-i-3d-tehnologii> (дата обращения: 05.10.2019).

4. Паспорт программы "Цифровая экономика Российской Федерации" [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://digital.gov.ru/uploaded/files/natsionalnaya-programma-tsifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federatsii_NcN2nOO.pdf (дата обращения: 27.10.2019).
5. **Шмырова В.** Власти потратят на цифровую экономику 400 млрд руб. за три года [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.cnews.ru/news/top/2018-11-23_vlasti_potratyat_na_tsifrovuyu_ekonomiku_400_mlrld (дата обращения: 27.10.2019).
6. Паспорт национальной программы "Цифровая экономика Российской Федерации" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/info/35568/> (дата обращения: 27.10.2019).
7. Финансирование национального проекта "Цифровая экономика" [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Финансирование_программы_Цифровая_экономика (дата обращения: 27.10.2019).
8. Сквозные технологии цифровой экономики. Журнал TADVISER [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Сквозные_технологии_цифровой_экономики (дата обращения: 27.10.2019).
9. **Пителинский К. В.** Циклическое управление сложными социоэкономическими системами и формирование лидеров трансформационного типа в условиях транзита европейской культуры // Вестник Московской международной академии. 2019. № 1. С. 98—116. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsiklichesкое-upravlenie-slozhnymi-sotsio-ekonomicheskimi-sistemami-i-formirovanie-liderov-transformatsionnogo-tipa-v-usloviyah> (дата обращения: 05.10.2019).
10. Распоряжение правительства Российской Федерации от 28 июня 2017 г. № 1632-р [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (дата обращения: 27.10.2019).
11. **Шмырова В.** Путин распорядился провести Wi-Fi в села с населением 100 человек [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.cnews.ru/news/top/2018-06-08_putin_poruchil_provesti_internet_v_sela_s_chislom (дата обращения: 27.10.2019).
12. Навигатор венчурного рынка. Журнал MoneyTree [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rvc.ru/upload/iblock/003/MoneyTree_2019_rus.pdf (дата обращения: 27.10.2019).
13. **Бахарев И.** Рынок электронной коммерции России: январь—июнь 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://e-pepper.ru/news/gynok-e-commerce-rossii-yanvar-iyun-2019.html> (дата обращения: 27.10.2019).

ON DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR THE DIGITAL ECONOMY OF THE RUSSIAN FEDERATION

K. V. Pitelinsky, A. O. Tikhomirov, A. A. Shirokov
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

A very topical issue is considered today — the role of information technology in the digitalization of the economy, as well as development in the Russian Federation. The aim of the work is to analyze the implementation of plans for the development of the digital economy in the Russian Federation using the example of comparison with foreign countries. The result is a study of existing and already approved programs in the field of informatization, identifying possible obstacles to this and proposing options for eliminating them.

Keywords: information technology, digital economy, innovative programs, growth points, development prospects.

Bibliography — 13 references.

Received December 26, 2019

УДК 621.9.06

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Д. С. Карнута

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

Рассмотрены вопросы развития новых технологий в машиностроении, их влияния на производство и применяемое оборудование. Описаны методы аддитивного производства, проведен анализ преимуществ и недостатков современных аддитивных технологий, исследованы их применение в различных областях промышленности, методы 3D-печати, тенденции и перспективы развития.

Ключевые слова: аддитивные технологии, машиностроение, 3D-печать, методы, проблемы, перспективы развития.

Технологические процессы, используемые в промышленном производстве, постоянно совершенствуются. Разрабатываются новые технологии для повышения качества и надежности создаваемой продукции, а также для обеспечения большей эффективности. В современной промышленности одними из передовых и востребованных являются аддитивные технологии. Многие сферы производства, такие, как строительство, машиностроение, судостроение, космонавтика и медицина, активно внедряют в свое производство новые технологии, включая 3D-печать, быстрое прототипирование, прямое цифровое производство и изготовление примесей.

Машиностроение как отрасль промышленности сформировалось в середине XIX в. В это время в Западной Европе (особенно в Великобритании) появились первые достаточно крупные машиностроительные предприятия. Именно к этому времени наука и техника дали промышленности конструкцию классического токарного и сверлильного станка с ручным управлением, появились станки-автоматы с кулачковым командоаппаратом, сверлильные станки для глубокого сверления. У станков появились механический паровой привод, один на все станки в цехе, механический винтовой суппорт для установки инструмента, возникли первые признаки взаимозаменяемости и, как следствие, серийное производство изделий. В производстве для обра-

ботки металла применялось оборудование двух видов — прессы (обработка давлением) и металлорежущие станки (обработка резанием). Для окончательной обработки применяли в основном металлорежущие станки. Эти станки работали на древнейшем принципе — работа с помощью режущего клина инструмента, на который необходимо было воздействовать определенной силой.

К 30-м гг. XX в. окончательно сформировался технологический облик классического машиностроения. Это деление станков по технологическим группам: токарные, фрезерные, сверлильные и т. д.; механическая кинематика со ступенчатым регулированием зубчатыми блоками, связанные кинематические цепи с настройкой с помощью сменных зубчатых колес (гитар), индивидуальный электропривод для каждого станка [1].

В 1952 г. в США появились первые станки с числовым программным управлением (ЧПУ), управляемые от компьютера. Программа работы была расположена на перфоленте. Это была революция в автоматизации металлорежущего оборудования.

До этого в металлорежущих станках применяли жесткую автоматизацию. Командоаппарат был чисто механическим, он задавал режим работы станка. Это были кулачки, копиры, концевые выключатели и т. д. Для изменения режима работы станка необходимо было заменить все эти механические элементы, а также переставить режущий инструмент. Все это требовало много сил и времени, отладка также требовала времени. В станках с ЧПУ впервые применили программное изменение режима работы станка. Здесь надо было просто поменять программу в компьютере управления, и станок сам в крат-

Карнута Дмитрий Сергеевич, научный заместитель
начальника кафедры УВП МО РФ ВУЦ.
E-mail: dima-karnuta@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2020 г.

© Карнута Д. С., 2020

чайшее время менял все свои технологические параметры для обработки другого изделия. В станках с ЧПУ не надо было иметь механические кинематические связи между рабочими органами. Эту связь осуществлял компьютер. Кинематическая структура станка с ЧПУ намного проще обычного станка с ручным управлением. Здесь нет органов настройки, переборных групп, гитар настройки. Каждый рабочий орган станка автономно, без механической связи с другими рабочими органами приводит в движение свой индивидуальный электродвигатель.

Согласованное движение рабочих органов обеспечивает управление двигателями со стороны компьютера. Вначале на станки ставили двигатели постоянного тока, но с середины 80-х гг. стали использовать двигатели переменного тока.

В 1971 г. были созданы микропроцессоры, которые значительно удешевили, уменьшили в размерах и сделали намного надежнее элементную базу компьютеров. Это незамедлительно было использовано в станках с ЧПУ. Они стали намного проще и дешевле.

Следующим шагом стало появление многоцелевых (другое обозначение — многооперационный, многозадачный) станков с ЧПУ в 80-х гг. Эти станки получили возможность выполнять огромный диапазон операций. Они имеют большой набор всевозможных режущих инструментов, которые последовательно по программе можно использовать при работе. Один станок может работать как токарный, фрезерный, расточной, сверлильный, зуборезный. При этом станок обрабатывает как черновые, так и чистовые операции. В своем составе он имеет несколько шпинделей, револьверных инструментальных суппортов, магазинов инструментов и т. д. Данные станки оснащают интеллектуальным программным обеспечением, которое можно оперативно вводить с дисплея. На дисплее отслеживается весь технологический процесс, дается его диагностика, состояние рабочих органов и т. п. (например, программный продукт NIAZATROL SMOOTHX компании MAZAK, Япония) [2].

Следует отметить, что в технологии машиностроения применяют два принципа построения технологического процесса: дифференциация и концентрация. У каждого из них есть свои плюсы и минусы.

Дифференциация — это принцип разбиения технологического процесса на отдельные операции, которые выполняют одновременно на разном оборудовании. Заготовка движется по конвейеру от станка к станку. Заготовок много. Это принцип массового производства — конвейер.

Он позволяет значительно ускорить процесс изготовления множества одинаковых деталей. При этом используют одновременную обработку нескольких деталей (многоместная обработка) и обработку одновременно несколькими инструментами (многолезцовая работа), что значительно ускоряет процесс.

При концентрации весь или большую часть технологического процесса проводят на одном оборудовании, одном рабочем месте. Операции выполняют последовательно, одну за другой. Пока одна операция не закончена, другую не начинают. При этом процессе обеспечивается принцип единства технологических баз. Здесь нет времени транспортировки заготовки от одного станка к другому. Но последовательное проведение технологических операций значительно удлиняет время работы.

В 1986 г. появились аддитивные технологии. Это принципиально новый вид обработки в машиностроении. Если раньше обработку производили удалением лишнего металла с заготовки (вычитание), то здесь, наоборот, в зону обработки подают порошок или смолу и луч лазера, избирательно нагревая определенные места, формирует заданное изделие. Идет процесс добавления материала в деталь. Известно много разновидностей этой технологии. В машиностроении в основном применяют SLS-технологии (Selective Laser Sintering — селективное лазерное плавление). По данной технологии сначала формируют слой из порошка, затем лазер фиксирует лучом определенный массив, слой вертикально перемещают, сверху создают новый слой. Цикл повторяют до полного формирования объекта. По данной технологии работают 3D-принтеры, применение металлического порошка позволяет получать реальные детали машины, годные к эксплуатации [3].

Применение аддитивной технологии в машиностроении

Все чаще можно услышать о концепции цифрового производства в современной промышленности. Авторы статьи [2] подробно рассказывают об этой концепции. Она включает создание цифровых моделей для тестирования и оптимизации продукта и производственных процессов. Послойное создание трехмерного объекта успешно применяют в технологии быстрого прототипирования для оценки свойств будущего изделия на ранних стадиях создания продукта. Основными способами такого прототипирования являются лазерная стереолитография (SLA), спекание или сплавление порошка лучом лазера

(SLM) и моделирование методом наплавления (FDM) [3]. Также популярность обретают технологии печати фотополимером (PolyJet) и LOM-технология, где в качестве исходного материала можно использовать обычную офисную бумагу или упаковочную пленку [2].

В работах [4, 5] рассмотрены возможности использования 3D-печати в самолетостроении. Разработки в области композитной и многокомпонентной печати открыли новые возможности для печати легких конструкций со сложными внутренними элементами, которые трудно изготовить с помощью традиционных способов. Способность печатать сложные внутренние структуры напрямую дает аддитивному производству преимущество перед обычным производством. В работах представлен обзор методов АП в испытательных моделях в аэродинамической трубе, а также приведены типичные примеры для использования разработчиками и исследователями в аэрокосмической промышленности. Испытания в аэродинамической трубе являются надежным средством проектирования самолетов. Точность и экономичность проектирования и изготовления модели для аэродинамической трубы оказывают существенное влияние на качество и цикл разработки самолетов. Быстрое прототипирование позволяет напрямую изготавливать 3D-детали и рассматривается как революционное достижение в технологии производства.

В патенте [6] авторы предлагают способ изготовления газотурбинного двигателя из металлического порошка с применением аддитивных технологий. Сам процесс должен проходить в специальной камере, заполненной науглероживающим газом. Последующую термическую обработку следует проводить с осаждением карбидов на границах зерен. Описанные условия обеспечивают высокотемпературную пластичность и увеличенное время до разрушения готового изделия. Данный метод можно использовать для аэрокосмической промышленности и газотурбинных двигателей, работающих в условиях высоких температур.

В [7] аддитивное производство упоминается как эко-инновация и экологическое решение в контексте строительства, т. е. создание нового конкурентоспособного по цене процесса или системы, полностью ориентированной на удовлетворение потребностей человека с минимальным количеством токсичных веществ и отходов. Из неиспользованного материала (порошок или смола) может быть сгенерировано новое сырье для того же использования или любого другого более широкого альтернативного

применения. Однако для промышленного внедрения необходимо решить некоторые технические проблемы, например, стандартизация рецептуры материалов и качество межфазного соединения между нанесенными слоями.

Аддитивные технологии, как показали последние исследования, применимы и для изготовления сложных электромеханических устройств и трансформаторов, при этом повышаются их производительность, надежность и экономическая эффективность. Использование технологии аддитивного производства для изготовления электромагнитов, а также других сложных деталей для машин, компонентов, сопряженных с очень сложными конструкциями, является довольно новым. Будущее поколение электротехнической промышленности находится под влиянием роста комбинированных технологий, таких как информационно-коммуникационные технологии и технологии аддитивного производства. Аддитивные технологии могут снизить стоимость продукта до 70 % и сократить время на получение продукта на 90 %. В будущем это может оказать сильное влияние на тенденции развития мирового рынка [8].

В [9] описывается применение аддитивных технологий в медицине, а именно в области кардиологии. С помощью 3D-принтера создают точную трехмерную модель сердца конкретного пациента для подготовки к сложным медицинским операциям. Благодаря этой модели хирург может предварительно исследовать анатомию пациента, что улучшает качество диагностики и предоперационное планирование.

Авторы [10] продемонстрировали перспективы внедрения аддитивных технологий в стоматологии. Производство зубных имплантатов и других стоматологических инструментов осуществляют по индивидуальному заказу с использованием данных автоматизированного проектирования (CAD). Стереолитография (SLA) позволяет создавать выравниватели, а прямое металлическое лазерное спекание (DMLS) способно производить высококачественную металлическую зубную коронку и каркасы прибора. Простое сканирование отдельных частей пациента с помощью стоматологического 3D-сканера позволяет быстро печатать модель зубов с высокой точностью. Все это еще раз подтверждает, что аддитивное производство обладает потенциалом для решения различных проблем в области медицины.

В [11] рассматривается создание имплантатов методом лазерного спекания титанового порошка или с использованием различных видов полимеров и композиционных материалов на ос-

нове полимеров. Главным преимуществом данного технологического процесса является реализация сложной геометрии наружной поверхности, а также возможность создавать специальные каналы внутри имплантата для внутренней доставки лекарств.

Преимущества аддитивных технологий:

- возможности изготовления изделий сложной формы с пустотами;
- возможности использования разных материалов без смешивания;
- легкие ячеистые структуры;
- микро- и наноструктурирование поверхности;
- функционализация поверхности (конструктор может предложить любую поверхность в своем проекте, он меньше связан технологическими ограничениями).

Недостатки аддитивных технологий:

- невысокая точность изготовления деталей, нет взаимозаменяемости (изделия, создаваемые по одной программе, могут иметь достаточно разные размеры);
- высокая шероховатость;
- анизотропия свойств изделий (разные свойства у изделия в зависимости от направления нагрузки; плотность материала может быть недостаточной и неоднородной);
- высокие остаточные напряжения (неравномерный нагрев изделия в процессе формирования создает остаточные напряжения, деформирует изделие);
- отсутствие системы контроля технологического процесса (во время работы нельзя видеть, как идет процесс, есть возможность получить в центре массива изделия дефектный фрагмент, который в дальнейшем может привести к поломке, причем достаточно сложно выявить такой скрытый дефект, невысокая точность воспроизведения заданной геометрии изделия);
- высокая стоимость изделия, очень высока стоимость порошка-сырья (дисперсность 5–30 мкм) — от 100 до 800 евро за килограмм [4].

Аддитивные технологии классифицируют [3] следующим образом.

Material Extrusion — "выдавливание материала" (рис. 1). К данному методу относится технология MJS (Multiphase Jet Solidification) — способ многофазного отверждения струи. Материал в виде нагретого выше температуры плавления порошка выдавливают через форсунку, послойно образуя деталь. Затем деталь помещают в печь для удаления связующего и последующего спекания [4].

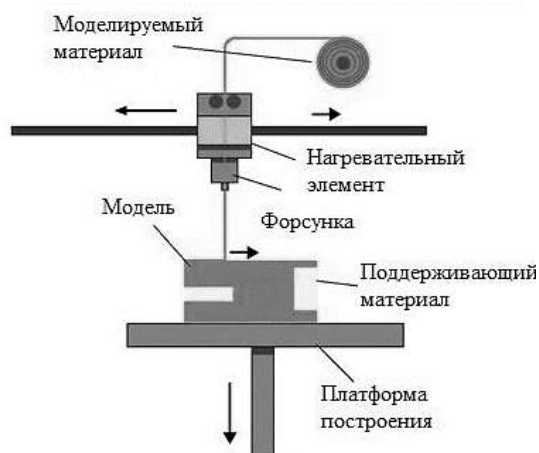


Рис. 1. Material extrusion — "выдавливание материала"

Material Jetting — "разбрызгивание материала", "струйные технологии". Данный метод основан на технологии Polyjet (рис. 2), согласно которой происходит послойное напыление жидкого материала на рабочую зону через многоструйную головку, позволяющую использовать различные материалы в одном цикле. Слои накладываются друг на друга, образуя объемную деталь.

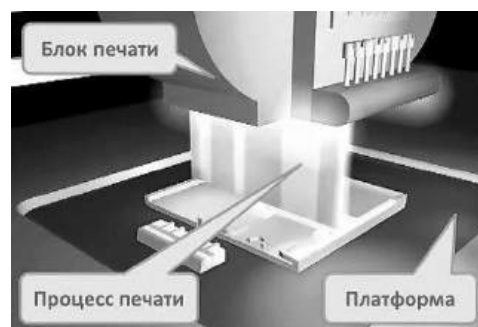


Рис. 2. Технология Polyjet

Blinder jetting — "разбрызгивание связующего". К данному методу относят струйные технологии, или Ink-Jet-технологии, где в отличие от Material Jetting в зону построения впрыскивается не модельный материал, а связующий реагент [5, с. 0307001-3].

Sheet lamination — "соединение листовых материалов" (рис. 3). К данному методу относят технологии, в которых листовой материал, представленный в виде полимерной пленки, металлической фольги и т. д., используют в качестве строительного материала. Технология UAM (Ultrasonic Additive Manufacturing) позволяет сваривать металлические пластины при помощи ультразвука. При этом остаточный материал удаляют фрезерованием.

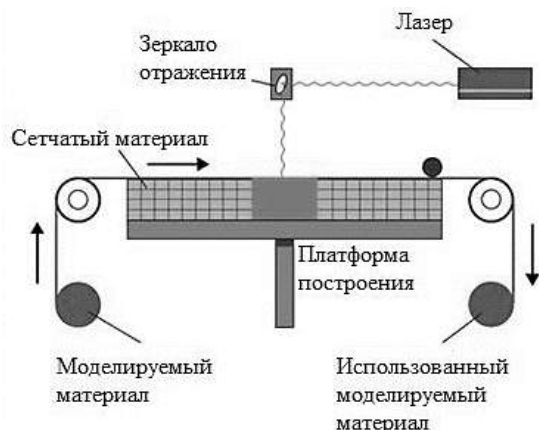


Рис. 3. Sheet lamination — "соединение листовых материалов"

Vat Photopolymerization — "фотополимеризация в ванне". Данный метод не используют в машиностроении, так как он не дает возможности работы с металлом.

Powder Bed Fusion — "расплавление материала в заранее сформированном слое". К данному методу относится группа SLS-технологий (рис. 4), в которых в качестве источника энергии для соединения частиц металлопорошковых композиций применяют лазер. Общей особенностью данных технологий является необходимость использовать специальные поддержки, которые удерживают деталь от термических деформаций.

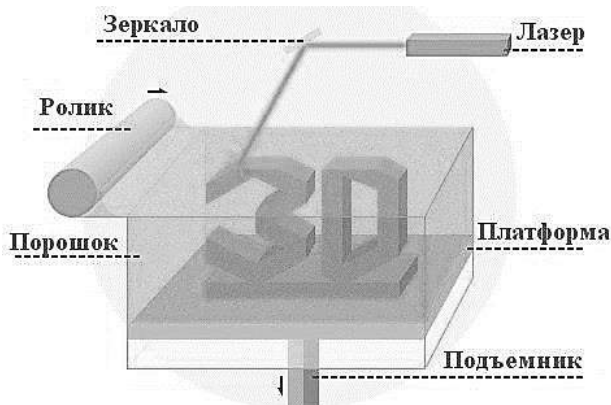


Рис. 4. SLS-технология

Directed Energy Deposition — "прямой подвод энергии непосредственно в место построения". К данному методу относят технологии, в которых материал и энергию для его сплавления (например, лазерное излучение) подводят одновременно в место, где в данный момент происходит построение детали.

Рассмотрев аддитивные технологии и существующие методы 3D-печати, можно сказать, что перспективы развития состоят в увеличении

количества 3D-машин, высококласного АФ-оборудования, а также в увеличении количества печатающих головок для сокращения времени изготовления изделий и в расширении видов используемого материала. Наибольшие перспективы среди методов 3D-печати имеют селективное плавление металлических порошков (SLS) и лазерная наплавка металлических порошков (LMD), которую преимущественно используют в ремонте и упрочнении поверхности детали при создании новых материалов или деталей с износостойкими и жаростойкими покрытиями. В ближайшем будущем необходимо развивать аддитивные технологии в отечественной промышленности путем разработки отечественных материалов, годных к промышленному применению, разработки отечественного оборудования и программного обеспечения, подготовки специального квалифицированного персонала и создания общепринятого стандарта. Кроме того, для развития данного направления необходима поддержка со стороны государства, которая поднимет его уровень на международном рынке.

Преимущества внедрения аддитивной технологии в современное производство машиностроительной продукции

Аддитивные технологии производства активно внедряют в машиностроение. Многие считают, что старые технологии резания уже не нужны, они будут полностью заменены новой аддитивной технологией. Автор с этим утверждением не согласен. Оборудование обеспечивает технологию производства изделия. Технология должна соответствовать ряду функциональных требований. Основные из них:

- скорость (производительность) выполнения готового изделия;
- точность получаемых размеров;
- точность получаемой формы;
- способность производить сложные криволинейные поверхности;
- стоимость технологического процесса;
- оперативность создания нового технологического процесса обработки изделия [5].

Оборудование должно соответствовать эксплуатационным требованиям:

- простота и надежность конструкции;
- неприхотливость в эксплуатации, требованиях к среде и помещению;
- ремонтпригодность;
- простота обслуживания, включая наладку и обучение персонала.

Для разных деталей и программ их изготовления значение этих требований имеет разную

важность, что определяет применение оборудования разного типа.

Например, для деталей простой конфигурации, выпускаемых большой партией (несколько тысяч штук; это валы, плиты, простые корпуса, втулки, диски и т. д.), главные параметры технологического процесса — скорость и стоимость. Этими свойствами в полной мере обладают станки-автоматы с кулачковым командоаппаратом или управлением от концевых выключателей. Хорошо отлаженный станок может за 1 ч выпустить десятки одинаковых изделий с невысокой стоимостью. Это такие изделия, как поршни, гильзы, поршневые кольца для двигателей, болты и гайки, простые валы и зубчатые колеса. Эти изделия необходимы в огромных количествах, их конструкция довольно консервативна, изменения происходят нечасто.

Станки с ручным управлением, несмотря на их длительную историю, также можно применять. Главное их преимущество — неприхотливость в эксплуатации. Эти станки не требуют специального помещения, в них не применяют сложные дорогие электронные микросхемы, им не надо особой среды (влажность, температура, чистота воздуха и т. д.). Их трудно сломать, достаточно легко отремонтировать собственными силами и т. д.

Делать деталь "поршень" на станке с ЧПУ невыгодно. Например, если поршень для грузового автомобиля (диаметр 100 мм, вес 2 кг) будет обрабатывать многоцелевой станок, он, последовательно обрабатывая каждую поверхность, затратит на это 20–30 мин. Аддитивное оборудование затратит на это не менее 6–8 ч, причем точность обработки и шероховатость не будут соответствовать нормативным требованиям. На изготовление поршня уйдет 2 кг порошка стоимостью как минимум 200 евро. Обычная автоматическая линия из 4–6 станков с управлением от концевых выключателей, многоместной и многорезцовкой обработкой будет выпускать один поршень каждые 2–3 мин в течение многих часов и дней. Для такого производства скорость переналадки не имеет значения, переналадка

бывает крайне редко. При этом цена всех станков меньше стоимости одного многоцелевого станка или промышленной аддитивной установки.

Многоцелевые станки с ЧПУ и аддитивное оборудование очень требовательны к среде. Им необходимы абсолютно чистое помещение, отсутствие грязи и пыли, особый температурный режим, высокий уровень квалификации персонала, их легко сломать, трудно ремонтировать и т. д.

Заключение

Аддитивное производство является универсальным, гибким, легко настраиваемым и подходит для большинства секторов промышленного производства. Развитие и усовершенствование методов аддитивных технологий, внедрение их в стоматологию, медицину, строительство, самолетостроение и другие области промышленности позволит улучшить качество готовой продукции, добиться экономии сырья и обеспечит возможность производства изделий со сложной геометрией.

Новые технологии способны в несколько раз упростить производственный процесс создания деталей. Темпы развития аддитивных технологий в России, как и во всем мире, стремительно увеличиваются. Но это приводит и к ряду проблем. Например, в России самыми распространенными проблемами являются нехватка квалифицированных кадров, недостаток отечественных материалов, а также слабая проработка методических основ производства новых изделий, создаваемых при помощи аддитивных технологий.

Аддитивное производство — перспективная технология изготовления изделий единичного и мелкосерийного производства во многих отраслях промышленности (машиностроение, авиационная и космическая отрасли, медицина и т. д.). По всей видимости, это очередной этап в научном развитии человечества и за подобными способами производства стоит большое будущее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Niaki M. K., Torabi S. A., Nonino F. Why manufacturers adopt additive Manufacturing technologies: The role of sustainability // J. Cleaner Production. 2019. V. 222. P. 381–392.
2. Нефедова Л. А., Лепехин А. А. Технологические процессы аддитивного производства в контексте цифровой трансформации предприятий // Перспективы науки. 2018. № 12 (111). С. 50–54.
3. Колесников Л. А., Манжула Г. П., Шелег В. К., Якимович А. М. Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности // Наука и техника. 2013. № 5. С. 3–9.

4. **Goh G. D., Agarwala S., Goh G. L., Dikshit V., Sing S. L., Yeong W. Y.** Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential // *Aerospace Science and Technology*. 2017. V. 63. P. 140—151.
5. **Weijun Zhu.** Models for wind tunnel tests based on additive manufacturing technology: Progress in Aerospace Sciences, Available online 16 May 2019.
6. **Матейчик, Даниэль Э., Свинглер, Колин Л.** Аддитивное изготовление, обеспечивающее высокотемпературную пластичность и увеличенное время до разрушения. Патент РФ № 2670827. 2017. Бюл. № 7.
7. **Ghaffar S. H., Corker J., Fan M.** Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution // *Automation in Construction*. 2018. V. 93. P. 1—11.
8. **Magisetty R. P., Cheekuramelli N. S.** Additive manufacturing technology empowered complex electro-mechanical energy conversion devices and transformers // *Applied materials today*. 2019. V. 14. P. 35—50.
9. **Haleem A., Javaid M., Saxena A.** Additive manufacturing applications in cardiology: A review // *The Egyptian Heart J*. 2018. V. 70. Iss. 4. P. 433—441.
10. **Javaid M., Haleem A.** Current status and applications of additive manufacturing in dentistry: A literature-based review // *J. Oral Biology and Craniofacial Research*. 2019. V. 9. Iss. 3. P. 179—185.
11. **Кузнецов В. П., Горгоц В. Г., Аникеев А. В., Еманов А. А.** Производство новых внутрикостных остеointегрируемых имплантатов методом аддитивных технологий // *Вестник курганского государственного университета. Сер. "Технические науки"*. 2017. № 2 (45). С. 120—125.

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES AT THE PRESENT STAGE OF ENGINEERING DEVELOPMENT

D. S. Karnuta

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

Today, one of the most promising and dynamically developing areas of "digital" production is additive technologies. The article deals with the development of new technologies in mechanical engineering, their impact on production and equipment used. The methods of additive manufacturing are considered, the advantages and disadvantages of modern additive technologies are analyzed, as well as their application in various fields of industry, 3D printing methods, trends and prospects for development.

Keywords: additive technologies, mechanical engineering, 3D printing, methods, problems, development prospects.

Bibliography — 11 references.

Received April 28, 2020

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИСПАРИТЕЛЕЙ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН С УЧЕТОМ ЛОКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТРУБ ТРУБНОГО ПУЧКА

В. В. Спирыгин, канд. техн. наук

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

Проведена оценка эффективности методики технического диагностирования металлоконструкций испарителей холодильных машин с применением акустической эмиссии. Установлено, что применение разработанного диагностического обеспечения позволяет повысить надежность испарителей холодильных машин, выраженную в приращении вероятности невозникновения аварийной ситуации.

Ключевые слова: техническое диагностирование, акустическая эмиссия, теплообменные аппараты, испарители, техническая эффективность, надежность.

Для объектов, функционирующих в условиях сверхгарантийной эксплуатации, существует объективная необходимость разработки таких способов эксплуатации, которые при существенно ограниченных лимитах средств, выделенных на обеспечение эксплуатации и обслуживающего персонала, могут позволить поддерживать техническое состояние оборудования на заданном уровне, исключить отказы, ведущие к непредсказуемым последствиям и полной утрате работоспособности, обеспечить безопасность эксплуатации и эффективность работы оборудования, экономию средств на оплату энергоресурсов и в целом на эксплуатацию.

При использовании по назначению оборудования, работающего под давлением (ОРД) в условиях сверхгарантийной эксплуатации, большое внимание следует уделять оценке технического состояния (ТС) и выбору параметров диагностирования, которые позволят за некоторое время до возникновения отказа вывести систему из эксплуатации для проведения ее ремонта или замены.

В связи с большим разнообразием имеющихся методов и средств неразрушающего контроля качества (НК) ОРД требуется обоснованный подход к их выбору в целях применения в конкретных условиях эксплуатации. Этот выбор ба-

зируется на совокупной технико-экономической оценке различных методов и средств дефектоскопии.

Выбор методов и средств НК, необходимых для проведения технического диагностирования (ТД) металлоконструкций (МК) ОРД, определяется характером предполагаемых дефектов, дефектоскопической технологичностью контролируемых объектов, разрешающей способностью метода и производительностью контроля, выявляемостью дефектов и приведенными затратами. Оценка ТС ОРД с применением действующей нормативной документации проводится преимущественно с позиции обеспечения промышленной безопасности сосудов, работающих под избыточным давлением. При этом анализ параметров, влияющих на потерю работоспособности, не производится [1].

Целью данной работы является обоснование эффективности применения нового диагностического обеспечения такого оборудования, как испарители холодильных машин (ХМ), позволяющего по параметрам сигналов акустической эмиссии (АЭ) заблаговременно определять дефекты в виде пластической деформации теплообменных труб до разгерметизации.

Технико-экономическая оценка эффективности методики технического диагностирования металлоконструкций испарителей холодильных машин с учетом локальной деформации труб трубного пучка

Для оценки и контроля ТС таких ОРД, как испарители ХМ, выполненных в виде кожухо-

Спирыгин Валерий Викторович, преподаватель.
E-mail: V.V.Spiryagin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 11 марта 2020 г.

© Спирыгин В. В., 2020

трубных теплообменных аппаратов, могут быть применены как отдельные варианты методов НК, так и их сочетания. Совокупность вариантов одного или различных методов НК, используемых для оценки ТС объектов, называют системой неразрушающего контроля (системой НК). Такое определение системы НК соответствует ГОСТ 16504-81 [2]. В частном случае некоторая система НК C_j может включать один (t) или несколько (t_0) вариантов метода (M).

Обозначим вариант через t , где $t = 1, t_0$, а вариант метода — через M_t . Преимущество систем НК состоит и в том, что при совокупном использовании различных методов НК получается большее количество информации о наблюдаемом объекте, которое практически недостижимо при использовании этих вариантов самостоятельно.

Для НК одного и того же объекта в общем случае может быть использовано множество различных методик ТД с различными системами C_j , где $j = 1, j_0$. Выбор конкретной методики ТД должен быть основан на оценке эффективности ее применения.

В основу оценки эффективности методики ТД испарителя ХМ, описанной в работе [3], положен учет полезного результата и затрат на ее применение. Для количественной оценки эффективности системы C_j неразрушающего контроля качества целесообразно использовать интегральный критерий эффективности Q_j [4], отражающий соотношение степени соответствия системы поставленной цели (техническая эффективность G_j) и суммарных затрат $\Theta_{\Sigma j}$, за счет которых достигнута эта техническая эффективность:

$$Q_j = G_j / \Theta_{\Sigma j}. \quad (1)$$

Мерой технической эффективности G_j системы C_j может служить приращение ΔH_j надежности испарителя, обязанное устранению дефектов, выявленных системой. В целях оценки G_j как приращения ΔH_j вероятности невозникновения аварийной ситуации в объекте после устранения дефектов, выявленных системой G_i относительно исходного значения H_0 , определяют типы дефектов D_{ki} , которые могут встретиться в объекте и их потенциальную опасность $P(A_{ki})$, распределения $f_{ki}(m)$ числа m дефектов D_{ki} , вероятности $P_{\text{д.оп}}(B_{ki}/M_t)$ обнаружения дефектов D_{ki} методами M_t , входящими в методику [4]:

$$G_j = \Delta H_j = H_j - H_0; \quad (2)$$

$$H_0 = \prod_{ki=1}^{(ki)_0} \left\{ \sum_{m=0}^{m_{ki0}} [1 - P(A_{ki})]^m f_{ki}(m) \right\}; \quad (3)$$

$$H_j = \prod_{ki=1}^{(ki)_0} \left[\sum_{m=0}^{m_{ki0}} \{1 - P(A_{ki})[1 - P_{\text{д.оп}}(B_{ki} / C_j)]\}^m f_{ki}(m) \right], \quad (4)$$

где $P_{\text{д.оп}}(B_{ki} / C_j) = 1 - \prod_{t=1}^{t_0} [1 - P_{\text{д.оп}}(B_{ki} / M_t)]$ —

априорная вероятность выявления дефекта k системой C_j .

Эффективность Q_j системы контроля C_j зависит от множества $X_j = \{x_j\}$, где $i = 1, n$, параметров самой системы и от множества $Y = \{y_s\}$, где $s = 1, m$, параметров контролируемых объектов:

$$Q_j = Q(X_j, Y). \quad (5)$$

В соответствии с этим при разработке методик ТД правомерны следующие формулировки задачи [4].

- Минимизация затрат на функционирование системы ТД при условии, что обеспечена техническая эффективность не ниже некоторого минимально допустимого значения G^* , т. е. необходимо найти:

$$\Theta_{\min} = \min_{G \geq G^*} \Theta(X, Y). \quad (6)$$

- Максимизация технической эффективности при затратах, не превышающих допустимого значения, т. е. необходимо определить

$$G_{\min} = \max_{\Theta \leq \Theta^*} G(X, Y). \quad (7)$$

В объеме ТД по предлагаемой методике предусмотрено применение методов НК, аналогичных действующим нормам и правилам в области диагностирования и продления срока службы сосудов, работающих под давлением [5, 6]. В связи с этим оценка эффективности сводится к определению технической эффективности.

В общем случае в практике НК оценка G_i по формулам (2)—(4) может быть ограничена ввиду возникновения одной или одновременно нескольких ситуаций:

- неизвестны распределения $f_{ki}(m)$. При этом $f_{ki}(m)$ допускается заменять известными значениями $f_{ki}(0)$ и $f_{ki}(\hat{m})$, где \hat{m} — наиболее вероятное для данного объекта число дефектов D_{ki} ;
- отсутствуют либо неизвестны значения потенциальной опасности $P(A_{ki})$, однако известны значения коэффициентов опасности r_{ki} дефек-

тов D_{ki} . При этом значения $P(A_{ki})$ заменяют условными значениями $P^*(A_{ki})$:

$$P_k^*(A) = P_T^*(A)r_k / r_T; \quad (8)$$

- для диагностируемых или аналогичных объектов отсутствуют значения $P_{д.оп}(B_{ki}/M_t)$. В таком случае $P_{д.оп}(B_{ki}/M_t)$ для каждого метода НК устанавливают экспериментально.

Основными типами дефектов, встречающихся в МК испарителя ХМ, являются различного рода несплошности, структурные неоднородности, отклонения размеров и физико-механических свойств МК от значений, нормированных в НТД [7, 8]. Наиболее опасным типом дефектов является образование трещин в МК. В связи с этим в практике НК под дефектом априорно понимают наличие в объекте контроля трещиноподобных дефектов (если иной дефект не оговорен дополнительно). Особую группу составляют сквозные дефекты, т. е. несплошности, пронизывающие всю толщину объекта и выходящие на две его противоположные поверхности. Для объектов оболочкового типа наличие подобных дефектов приводит к нарушению герметичности.

Отличием предложенной методики ТД [3] от действующих является устранение ошибки второго рода, связанной с недобраковкой дефектов, приводящих к отказам (разгерметизации) в межрегламентный период, за счет получения информации о наличии в испарителе локальной деформации труб [9] при одновременном сохранении периодичности проверок в условиях ограниченности сил и средств.

В общем случае дефекты любого из рассмотренных типов (трещины, несплошности, локальные деформации труб) являются потенциально опасными. Потенциальная опасность проявляется в вероятности возникновения аварийной ситуации при эксплуатации испарителя из-за указанных дефектов, даже если дефект в объекте один. Наличие дефекта в виде локальной деформации трубы испарителя в случае невыявления его при ТД приведет к развитию дальнейшей пластической деформации в процессе эксплуатации и в конечном итоге к нарушению герметичности вальцовочного соединения. Наличие трещин в корпусе испарителя и истечений рабочих сред также является недопустимым.

В таком случае указанные дефекты условно разделяют на два вида: допустимые и недопустимые. При этом первым приписывается значение потенциальной опасности $P(A_{дл}) = 0$, а вторым — $P(A_{нл}) \approx 1$.

С учетом недопустимости возникновения дефекта примем распределение $f_{ki}(m)$ числа m дефектов равным $f_k(1) = 1$ при $m_{нл} = 1$ и $P(A_{нл}) = 0,9$. Тогда выражения (3), (4) примут вид

$$H_0 = 1 - P(A_{нл}); \quad (9)$$

$$H_j = \prod_{k=1}^{(k)_0} \{1 - P(A_{нл})[1 - P_{д.оп}(B_k / C_j)]\} = \prod_{k=1}^{(k)_0} \left[1 - 0,9 \left(1 - \left\{ 1 - \prod_{t=1}^{t_0} [1 - P_{д.оп}(B_k / M_t)] \right\} \right) \right] = \prod_{k=1}^{(k)_0} \left\{ 1 - 0,9 \left[1 - \left(1 - \left\{ [1 - P_{д.оп}(B_k / M_1)] \times \dots \times [1 - P_{д.оп}(B_k / M_2)] \times \dots \times [1 - P_{д.оп}(B_k / M_i)] \right\} \right) \right] \right\}. \quad (10)$$

В типовых методиках ТД необходимым условием дальнейшей безопасной эксплуатации сосудов ХМ на расчетных или разрешенных параметрах является выполнение условий прочности, установленных в руководящих документах РД 10.249-98, ГОСТ 25859, ОСТ 108.031.09. Если по указанным условиям прочности элементы холодильной машины, нагруженные испытательным давлением, не выдерживают испытательное давление (ввиду утонения стенок от коррозии, эрозии, других повреждений либо из-за снижения механических свойств основного металла, сварных соединений или пониженных запасов прочности), то решение о возможности, сроках и условиях дальнейшей эксплуатации ХМ принимается специализированной научно-исследовательской организацией после восстановительного ремонта или замены элементов, не удовлетворяющих условиям прочности.

В общем случае объем ТД по стандартным методикам включает проведение визуально-измерительного контроля (ВИК) наружной поверхности испарителя, ультразвукового контроля сплошности МК (УЗК), пневматических испытаний с контролем АЭ.

В табл. 1 представлены данные о выявляемости наиболее опасных дефектов, встречающихся в теплообменных аппаратах [10].

Таблица 1

Оценка выявляемости дефектов МК испарителя различными методами НК

Вид дефекта	Выявляемость дефектов МК испарителя при применении видов НК		
	оптического	ультразвукового	акустической эмиссии
Трещины	0,2	0,7	0,9
Течь	0,2	0,9	0,9
Пластическая деформация	0,01	0,01	0,9

Ввиду отсутствия в типовых методиках тестового воздействия на дефекты в виде локальной пластической деформации теплообменных труб выявление подобного дефекта наравне с УЗК и ВИК стремится к нулю. В результате техническая эффективность системы C_1 , применяемой в типовых методиках, при возникновении в исследуемом испарителе дефектов в виде трещины или локальной деформации с учетом (2), (9), (10) равна

$$G_1 = \Delta H_1 = H_1 - H_0 = (1 - 0,9 \{1 - [1 - (1 - 0,9)(1 - 0,01)]\}) - 0,1 = 0,81. \quad (11)$$

Система НК C_2 по предлагаемой методике включает проведение оценки ТС испарителя методами, аналогичными C_1 , однако разработанное диагностическое обеспечение [3] позволяет выявлять локальную деформацию труб с достоверностью $P = 0,9$.

Оценка достоверности выявления дефектов в виде локальной деформации проведена на основании статистической обработки результатов эксперимента по оценке влияния несовершенства геометрической формы теплообменных труб на величину критического давления [11]. Для оценки наступления предельного состояния по показаниям АЭ и оценки достоверности достижения контролируемым объектом данного состояния в ходе основного эксперимента использована партия эталонных теплообменных труб, не содержащих дефектов, в количестве 10 единиц и труб в количестве 40 единиц, в которых моделировали локальное деформирование.

Достоверность акустико-эмиссионного контроля можно определять, применяя выражение

$$D_{АЭ} = \frac{m_T + m_H}{m_{\Sigma}}, \quad (12)$$

где m_T — число образцов без дефекта, техническое состояние которых идентифицировано методом АЭ;

m_H — число образцов с дефектом, техническое состояние которых идентифицировано методом АЭ;

m_{Σ} — общее число образцов.

Контроль испытаний теплообменных труб при нагружении их внешней распределенной нагрузкой в корпусе физической модели испарителя с применением метода АЭ [11] показал, что начало старта пластической деформации регистрируется при использовании различных параметров АЭ. Например, при изменении скорости счета АЭ удалось зафиксировать начало развития дефекта при испытании 36 образцов из 40 (90 %), при использовании скорости счета АЭ и суммы импульсов АЭ — при испытании 37 образцов (92,5 %). При испытании образцов без дефекта для 9 труб из 10 (90 %) сигналы, характерные для пластического течения материала, не наблюдались вплоть до значения нагрузки, соответствующего 96—100 % от предела текучести материала.

Возникновение сигналов АЭ, превышающих пороговое значение и интерпретированных как начало пластического течения материала трубы при отсутствии подтверждающих сигналов от тензодатчика о деформации, очевидно, связано с неравномерностью создания испытательного давления. По результатам испытаний составлена матрица достоверности (табл. 2).

Таблица 2

Матрица достоверности по результатам экспериментальной оценки влияния несовершенства геометрической формы теплообменных труб на величину критического давления

Метод контроля и оценка его результатов для всех образцов ($m_{\Sigma} = 50$)		Исходный (эталонный) метод контроля наличия дефектов — визуально-измерительный контроль	
		Число эталонно-годных	Число эталонно-негодных
Метод АЭ	Число годных образцов	Дважды годные $m_T = 9$	Недобраковка $m_B = 4$
	Число негодных образцов	Перебраковка $m_a = 1$	Дважды негодные $m_H = 36$

Путем анализа полученных данных вычислены вероятность принятия безошибочного решения по альтернативному признаку при использовании метода АЭ, вероятность перебраковки и недобраковки (пропуска дефектов):

$$D_{AЭ} = \frac{9 + 36}{50} = 0,9; \quad (13)$$

$$P_{\alpha} = \frac{1}{50} = 0,02; \quad (14)$$

$$P_{\beta} = \frac{4}{50} = 0,08. \quad (15)$$

Вероятность пропуска дефектов при контроле методом АЭ составила $P_{\beta} = 0,08$, вероятность перебраковки — $P_{\alpha} = 0,02$. Полученные значения достоверности АЭ-контроля данной партии образцов несмотря на ограниченность количества испытаний дают представление о порядке величины достоверности АЭ, т. е. вероятности выявления дефекта в виде локальной пластической деформации теплообменных труб $P_{AЭ \text{ л.д.}} = 0,9$.

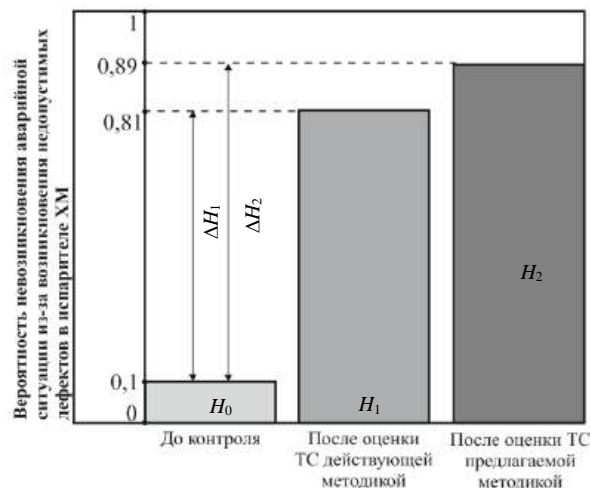
С учетом полученных данных определим значение G_2 :

$$\begin{aligned} G_2 &= \Delta H_2 = H_2 - H_0 = \\ &= (1 - 0,9 \{1 - [1 - (1 - 0,9)(1 - 0,9)]\}) - 0,1 = \quad (16) \\ &= 0,89. \end{aligned}$$

Таким образом, применение новой методики позволит повысить надежность испарителей ХМ, выраженную в приращении вероятности невозникновения аварийной ситуации ($\Delta H_2 = 0,89$), относительно типовых методик ($\Delta H_1 = 0,81$) и исходного значения ($H_0 = 0,1$) (рисунок).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бигус Г. А., Даниев Ю. Ф. Техническая диагностика опасных производственных объектов. — М.: Наука, 2010. — 415 с.
2. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2011. — 72 с.
3. Спирыгин В. В. Разработка методики технического диагностирования металлоконструкций испарителей холодильных машин систем холодоснабжения ракетных комплексов с применением метода акустической эмиссии // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 4 (144). С. 34—40.
4. Гурвич А. К., Ермолов И. Н., Сажин С. Г. Неразрушающий контроль. Справочник в 5 кн. Кн. 1. Общие вопросы. Контроль проникающими веществами. — М.: Высшая школа, 1992. — 829 с.
5. РД 03-421-01 Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. Введ. постановлением Госгортехнадзора России от 06.09.2001. № 39. — М.: [б. и.], 2001. — 31 с.
6. Приказ Ростехнадзора от 25.03.2014 № 116 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности".



Приращение вероятности невозникновения аварийной ситуации типовых и предлагаемой методик ТД испарителей ХМ

Заключение

В результате проведенной оценки эффективности предлагаемой методики ТД установлено, что разработанное диагностическое обеспечение металлоконструкций испарителя ХМ на основе применения метода акустической эмиссии позволит повысить надежность испарителей ХМ, выраженную в приращении вероятности невозникновения аварийной ситуации, $\Delta H = 0,89$, что на 8 % выше относительно типовых методик ТД. Указанный положительный эффект достигается путем повышения вероятности принятия безошибочного решения при оценке ТС испарителя за счет уменьшения ошибки второго рода, связанной с недобраровкой дефектов теплообменных труб, приводящих к потере работоспособности.

7. Чмыхало А. И., Сониная Т. С., Медеяев И. А., Панкин Д. А. Оценка влияния длительной эксплуатации стали 12X18H10T в коррозионной среде на развитие специфических коррозионных повреждений: сб. статей "Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем". — Серпухов, 2017. С. 107—111.

8. Спирагин В. В. Анализ технического состояния металлоконструкций систем охлаждения ракетной техники, способов оценки и продления сроков их службы: тр. VII Междунар. конф. "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов". 2017. С. 743—745.

9. Спирагин В. В., Медеяев И. А., Чмыхало А. И. Модель потери работоспособности металлоконструкций испарителя холодильной машины // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 11. С. 483—492.

10. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. Ключева В. В. — М.: Машиностроение, 2003. — 656 с.

11. Спирагин В. В., Медеяев И. А., Чмыхало А. И. Экспериментальная оценка влияния несовершенства геометрической формы теплообменных труб на величину критического давления // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 12. С. 531—536.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE TECHNICAL DIAGNOSIS OF METAL STRUCTURES OF EVAPORATORS OF REFRIGERATION MACHINES OF REFRIGERATION SYSTEMS OF MISSILE SYSTEMS USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

V. V. Spiryagin

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

The article is devoted to assessing the effectiveness of the technique of technical diagnostics of the metal structures of evaporators of refrigerators using acoustic emission. It has been established that the use of the developed diagnosability provision makes it possible to increase the reliability of evaporators of refrigerating machines, expressed in increments of the probability of no emergency.

Keywords: technical diagnostics, acoustic emission, heat exchangers, evaporators, technical efficiency, reliability.

Bibliography — 11 references.

Received March 11, 2020

УДК 665.6:536

ПЛОТНОСТЬ АВИАЦИОННЫХ МАСЕЛ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Н. А. Овчинников, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «КГТА им. В. А. Дегтярева», г. Ковров, Владимирская обл., Россия

Б. А. Григорьев, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», пос. Развилка, Московская обл., Россия

Приводятся результаты экспериментального исследования плотности шести образцов авиационных масел при повышенных до 600 бар давлениях в интервале температур 293—473 К. Опытные данные обобщены на основе принципа соответственных состояний с использованием изотермического уравнения состояния Тейта. Полученная зависимость образует методическую основу для расчета плотности авиационных масел при повышенных давлениях. В качестве исходных данных использованы данные об основных физико-химических свойствах масел.

Ключевые слова: плотность, авиационные масла, псевдокритическая температура, уравнение Тейта.

Знание теплофизических свойств авиационных масел в широкой области параметров состояния имеет большое значение для обеспечения заданных технико-эксплуатационных характеристик и ресурса двигателя. Как известно, авиационные масла по функциональному назначению подразделяют на масла для поршневых и газотурбинных двигателей самолетов, а также для различных агрегатов вертолетов [1]. В зависимости от типа газотурбинного двигателя различают масла для турбореактивных двигателей (ТРД) и масла для турбовинтовых двигателей (ТВД). По составу авиационные масла подразделяют на минеральные масла, т. е. масла на нефтяной основе, и на синтетические. В [2] авторами были приведены результаты экспериментального исследования плотности авиационных масел при атмосферном давлении. Данная работа посвящена изучению плотности авиационных масел при повышенных давлениях.

Экспериментальная техника и материалы

Измерение плотности авиационных масел при повышенных давлениях в интервале темпе-

ратур от 293 до 473 К и давлений от атмосферного до 600 бар выполнено на экспериментальной РВТ-установке, реализующей метод пьезометра постоянного объема. Измерения плотности масел проводили на 4 изотермах, разбивающих исследуемый температурный интервал на равные части. Средняя квадратическая погрешность определения плотности при повышенных давлениях составила $\pm 0,05\%$. Подробно описание экспериментальной установки и методики проведения измерений приведено в [3—5].

Для исследования были взяты 6 образцов авиационных масел как на нефтяной, так и на синтетической основе, применяемых в ТРД и ТВД. Для всех образцов масел предварительно были определены основные физико-химические свойства, такие как относительная плотность ρ_4^{20} , показатель преломления n_D^{20} , молекулярная масса M . На основе данных об относительной плотности и показателе преломления рассчитаны значения интерцепта рефракции R . Для определения интерцепта рефракции R использована формула

$$R = n_D^{20} - \frac{\rho_4^{20}}{n_D^{20}}, \quad (1)$$

которая по данным [6] наиболее точно отражает особенности углеводородного состава нефтепродукта.

Физико-химические свойства авиационных масел представлены в таблице.

Овчинников Николай Александрович, доцент.

E-mail: anikov@yandex.ru

Григорьев Борис Афанасьевич, научный руководитель Центра исследований пластовых систем и технологического моделирования.

E-mail: gba_41@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 января 2020 г.

© Овчинников Н. А., Григорьев Б. А., 2020

Физико-химические свойства авиационных масел

Марка масла	Назначение	ρ_4^{20}	n_D^{20}	R	M
ВНИИНП 50-1-4у	ТРД, синтетическое	0,9264	1,4579	0,8225	405
МС-8рк	ТРД, минеральное	0,8767	1,4726	0,8773	270
ЛЗ-240	ТРД, синтетическое	1,0026	1,4608	0,7745	462
ПТС-225	ТРД, ТВД, синтетическое	0,9946	1,4593	0,7777	456
ВТ-301	ТРД, на основе кремнийорганики	1,1067	1,3879	0,5905	2110
МН-7,5у	ТВД, минеральное	0,8754	1,4755	0,8822	285

Результаты и обобщения

Для обобщения экспериментальных данных о плотности при повышенных давлениях использовано изотермическое уравнение Тейта

$$\rho_{Tp} = \rho_{T0} \left[1 - A \ln \left(\frac{B+p}{B+p_0} \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где ρ_{Tp} — плотность при температуре T и давлении p , кг/м³;

ρ_{T0} — плотность при температуре T и атмосферном давлении p_0 , кг/м³;

p — давление на изотерме, бар;

p_0 — атмосферное давление, бар;

A, B — коэффициенты уравнения Тейта.

Посредством специального алгоритма, основанного на методах нелинейного регрессионного анализа, из массива экспериментальных данных по каждому образцу масла выделены оптимальные значения коэффициентов A и B уравнения Тейта. Критерием оптимизации послужил минимум средней квадратической ошибки описания экспериментальных данных на основе уравнения (2). Значения коэффициента A уравнения Тейта являются индивидуальными константами для каждого образца масла, а значения коэффициента B уравнения Тейта постоянны для каждой изотермы.

Экспериментальные данные обобщены на основе подхода, основанного на использовании принципа соответственных состояний. Для определения псевдокритической температуры T_c использована формула Риизи, рекомендуемая для высокомолекулярных углеводородов [7]:

$$T_c = 218,9592 \exp \left[(-3,4 \cdot 10^{-4})M + (-0,40852)\rho_{15}^{15} + (-2,5 \cdot 10^{-5})M\rho_{15}^{15} \right] M^{0,331} (\rho_{15}^{15})^{0,813}, \quad (3)$$

где T_c — псевдокритическая температура, К;

M — молекулярная масса;

ρ_{15}^{15} — относительная плотность.

Для пересчета относительной плотности ρ_4^{20} в относительную плотность ρ_{15}^{15} использована формула:

$$\rho_{15}^{15} = 0,0112 + 0,99167\rho_4^{20}. \quad (4)$$

Коэффициент B уравнения Тейта является убывающей функцией псевдокритической температуры $\tau = T/T_c$. В качестве параметра приведения коэффициента B уравнения Тейта использовали значение $B_{\tau=0,5}$ при значении приведенной температуры $\tau = 0,5$. Значение параметра приведения $B_{\tau=0,5}$ определяли для каждого образца посредством графических построений зависимости коэффициента B от приведенной температуры $\tau = T/T_c$. Значение приведенной температуры $\tau = 0,5$ принято по той причине, что значение параметра приведения $B_{\tau=0,5}$ могло быть надежно выделено из экспериментальных данных. Зависимость приведенного коэффициента $B^* = B / B_{\tau=0,5}$ от приведенной температуры $\tau = T/T_c$ для всего массива опытных данных представлена на рис. 1.

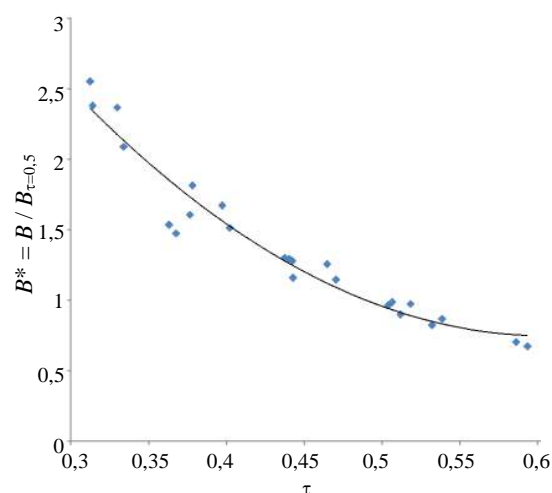


Рис. 1. Зависимость B^* от приведенной температуры τ

Показанная на рис. 1 зависимость обобщена уравнением вида

$$B^* = 18,74\tau^2 - 22,71\tau + 7,629. \quad (5)$$

Установлено, что значения параметра приведения $B_{\tau=0,5}$ и коэффициента A уравнения Тейта достаточно хорошо соотносятся со значениями характеристического параметра C , опосредованно характеризующего особенности химического состава исследуемого образца масла. Для настоящей работы принято целесообразным использовать характеристический параметр C в форме

$$C = \frac{1000R}{M}, \quad (6)$$

где R — интерцепт рефракции, определяемый по формуле (1);

M — молекулярная масса.

Зависимость параметра приведения $B_{\tau=0,5}$ от характеристического параметра C представлена на рис. 2.

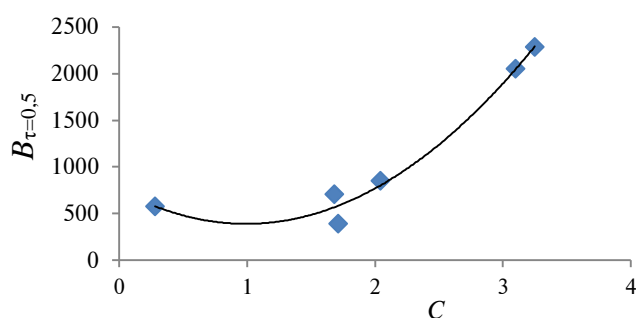


Рис. 2. Зависимость $B_{\tau=0,5}$ от характеристического параметра C

Представленная на рис. 2 зависимость может быть обобщена выражением вида

$$B_{\tau=0,5} = 372,3C^2 - 736,8C + 754,9. \quad (7)$$

Зависимость коэффициента A уравнения Тейта от характеристического параметра C представлена на рис. 3.

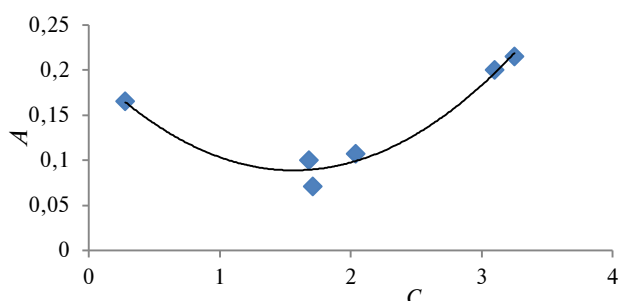


Рис. 3. Зависимость коэффициента A от характеристического параметра C

Представленная на рис. 3 зависимость может быть обобщена выражением вида

$$A = 0,045C^2 - 0,143C + 0,2. \quad (8)$$

На основе полученных данных может быть предложена методика расчета плотности авиационных масел при повышенных давлениях и различных температурах.

Алгоритм расчета представлен на рис. 4.

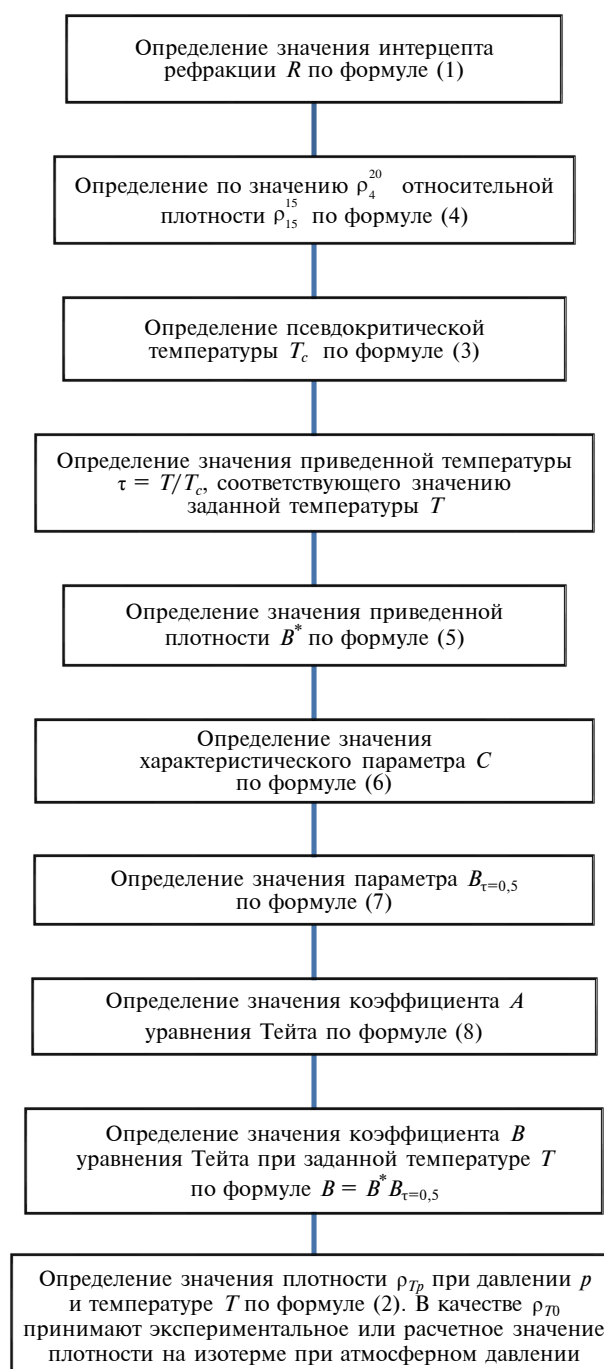


Рис. 4. Алгоритм расчета плотности при повышенном давлении

Заключение

В работе приведены результаты экспериментального исследования плотности шести образцов авиационных масел при повышенном до 600 бар давлении в интервале температур от 293 до 473 К. Экспериментальные данные обобщены на основе принципа соответственных состояний с использованием уравнения состояния Тейта. Полученная зависимость служит методической основой расчета плотности авиационных

масел при повышенном до 600 бар давлении в интервале значений приведенной температуры $\tau = 0,25-0,6$. В качестве исходной информации достаточно использовать данные об относительной плотности ρ_4^{20} , показателе преломления n_D^{20} и молекулярной массе M масла. Среднеквадратическая ошибка расчета плотности при повышенных давлениях при расчетном определении опорного значения плотности на изотерме при атмосферном давлении составляет $\pm 1,0\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бадыштова К. М., Берштадт Я. А., Богданов Ш. К. и др. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справ. изд. / под ред. Школьников В. М. — М.: Химия, 1989. — 432 с.
2. Овчинников Н. А., Григорьев Б. А. Плотность авиационных масел при атмосферном давлении // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2020. № 1 (145). С. 24—26.
3. Овчинников Н. А. Плотность нефтяных фракций и нефтепродуктов, полученных физическими и каталитическими процессами переработки нефти: дисс. ... канд. техн. наук. — М., 1993. — 169 с.
4. Григорьев Б. А. Исследование теплофизических свойств нефтей, нефтепродуктов и углеводородов: дисс. ... д-ра техн. наук. — Баку, 1979. — 524 с.
5. Шевченко Н. В. Экспериментальное исследование плотности нефтей и прямогонных нефтяных фракций до давлений 60 МПа: дисс. ... канд. техн. наук. — Грозный, 1978. — 204 с.
6. Быков М. И. О вычислении удельной и молекулярной рефракции углеводородов // Химия и технология топлив и масел, 1984. № 6. С. 38—39.
7. Riazi M.-R. Characterization and properties of petroleum fractions. 1st ed. p. cm. — (ASTM manual series: MNL50). — Philadelphia, 2005. — 407 p.

DENSITY OF AVIATION OILS AT ELEVATED PRESSURES

N. A. Ovchinnikov

Kovrov State Technological Academy named after V. A. Degtyarev, Kovrov, Vladimir region, Russia

B. A. Grigoryev

LLC "Gazprom VNIIGAZ", Razvilka village, Moscow region, Russia

The results of an experimental study of the density of six samples of aviation oils at elevated pressures up to 600 bar in the temperature range 293–473 K are given. Experimental data are generalized on the basis of the principle of corresponding states using the isothermal Tait equation of state. The obtained dependences form a methodological basis for calculating the density of aviation oils at high pressures. The data of basic physical and chemical properties of oils are used as the input parameters.

Keywords: density, aviation oils, pseudocritical temperature, Tait equation of state.

Bibliography — 7 references.

Received January 9, 2020

УДК 629.191

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ЧИСЛЕ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В. Н. Арсеньев, д-р техн. наук

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского", Санкт-Петербург, Россия

Д. П. Дубинин

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

Рассмотрена задача оценивания характеристик сложных систем по результатам испытаний ограниченного числа опытных образцов. Показано, что для принятия обоснованных решений о характеристиках системы целесообразно использовать метод приоритета опытной информации. Одним из основных достоинств этого метода является учет близости априорных данных к опытным, что фактически исключает необходимость проверки всей имеющейся информации на однородность. Он также может служить основой для сокращения числа натурных испытаний при их планировании. Приведен пример, иллюстрирующий основные достоинства метода.

Ключевые слова: сложная система, характеристики, ограниченные натурные испытания, метод приоритета опытной информации, выигрыш в оценивании.

Для принятия решения о возможности ввода в эксплуатацию перспективных сложных систем (СС), предназначенных для решения различных задач в области народного хозяйства, укрепления обороноспособности страны и т. д., проводится заключительный и наиболее дорогостоящий этап их экспериментальной отработки — натурные испытания (НИ) [1]. Из-за высокой стоимости опытных образцов, организации и проведения испытаний, а также в силу некоторых других причин не всегда удается получить необходимый объем опытных данных и, как следствие, статистически устойчивые оценки показателей, характеризующих качество функционирования СС [2–4]. В то же время всесторонний анализ факторов, влияющих на качество функционирования СС, на этапах, предшествующих НИ, позволяет получить их априорные оценки. В этих случаях для повышения качества оценивания характеристик СС используют опытно-теоретические методы, реализующие совместную обработку априорной информации и

результатов натурных испытаний опытных образцов [5].

Наиболее часто используемые методы комплексирования априорной и опытной информации [2–4, 6–17] можно разделить на несколько групп. Первую и самую большую группу составляют методы, базирующиеся на теореме гипотез (формуле Байеса) [2, 3, 6–10]. Качество оценок, полученных на основе этого подхода при ограниченных опытных данных, существенно зависит от априорного распределения. К сожалению, задача обоснованного выбора априорного распределения достаточно сложна и до сих пор нет ее общего удовлетворительного решения [11]. Кроме того, в байесовских процедурах, как правило, не учитывается близость априорной информации к результатам испытаний. Вторую группу составляют методы линейного объединения априорных и опытных оценок [3, 10–17]. Сложность их практического применения связана с отсутствием общих рекомендаций по выбору весовых коэффициентов для различных оценок. Еще большую неопределенность, на взгляд авторов, имеют апостериорные оценки, полученные на основе мультипликативных моделей и параметрических функций [3].

В некоторых случаях получить апостериорные оценки характеристик СС при ограниченном числе НИ позволяет метод максимума апостериор-

Арсеньев Владимир Николаевич, профессор.

E-mail: vladar56@mail.ru

Дубинин Дмитрий Павлович, преподаватель.

E-mail: dubinindp@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2019 г.

© Арсеньев В. Н., Дубинин Д. П., 2020

орной вероятности (Мав) [3]. Однако его применение становится проблематичным, когда результаты априорных исследований характеристик СС представлены не в виде законов распределения, а точечными оценками. Вторым тонким местом метода МАВ является отсутствие вероятностной меры, определяющей близость априорной информации к результатам испытаний и допустимость объединения этих данных [18]. Очевидно, что чем ближе априорная информация к результатам НИ, тем больше должен быть ее вклад в апостериорные оценки характеристик СС и выигрыш в точности оценивания. Существенное расхождение априорных и опытных данных говорит о нарушении принципа однородности и может привести не к уточнению оценок за счет учета априорной информации, а к их искажению. К сожалению, существующие подходы к учету неоднородности объединяемых данных не решают этой проблемы [19]. В некоторых частных случаях ее удается решить путем выбора весовых коэффициентов для информации, полученной из различных источников [14, 16–20].

Если есть основания полагать, что априорные оценки характеристик СС не противоречат опытным данным, полученным по результатам НИ, то можно предположить, что априорная и опытная информация является однородной, т. е. получена из одной генеральной совокупности. Тогда вид априорного распределения можно найти на основе функции правдоподобия для опытных данных, а в качестве параметров использовать их априорные оценки. Однако и в этом случае при использовании метода МАВ могут возникнуть трудности математического характера, связанные с необходимостью интегрирования сложных функций.

Перечисленных проблем при оценивании характеристик СС по ограниченному числу НИ, на взгляд авторов, позволяет избежать метод приоритета опытной информации (ПОИ), поскольку он не требует знания распределений априорных и опытных оценок [12]. Основные его достоинства по сравнению с указанными методами, и в большей степени с методом МАВ, удобно продемонстрировать на примере.

Постановка задачи

Рассмотрим перспективную систему посадки (СП) отделяющихся частей (ОЧ) ракеты-носителя в специально оборудованные районы посадки (РП) на земной поверхности.

Рассеивание средних точек приземления отделяющихся частей относительно центра РП характеризуют двумерным случайным вектором

$\hat{\mathbf{X}} = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2]^T$, распределенным по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и одинаковыми дисперсиями координат ("крышечка" обозначает случайную величину, а индекс "Т" — операцию транспонирования).

В этом случае модуль $\hat{R} = \sqrt{\hat{x}_1^2 + \hat{x}_2^2}$ случайного вектора $\hat{\mathbf{X}}$ распределен по закону Рэлея, а его функция плотности распределения определяется выражением [21]

$$\varphi_R(R; \mu) = R \exp\left(-R^2/2\mu\right)/\mu, \quad (1)$$

где $\mu > 0$ — параметр распределения, характеризующий точность функционирования СП.

Величину $\sigma = \sqrt{\mu}$ называют радиальным среднеквадратическим отклонением (РСКО) исходного двумерного нормального распределения.

По результатам априорных исследований СП ОЧ (до проведения НИ) получена априорная оценка μ_p параметра μ . В процессе натурных испытаний СП получены значения R_i , $i = \overline{1, N_{\text{оп}}}$,

модуля вектора $\hat{\mathbf{X}}$, характеризующего точность посадки $N_{\text{оп}}$ однотипных отделяющихся частей ракеты-носителя.

Необходимо методами ПОИ и МАВ найти апостериорные оценки $\mu_{\text{пои}}$ и $\mu_{\text{мав}}$ параметра μ .

Апостериорное оценивание параметра μ методом ПОИ

Для распределения Рэлея (1) функция правдоподобия имеет вид [22]

$$\prod_{i=1}^{N_{\text{оп}}} \varphi_R(R_i; \mu) = \frac{1}{\mu^{N_{\text{оп}}}} \prod_{i=1}^{N_{\text{оп}}} R_i \exp\left(-\frac{1}{2\mu} \sum_{i=1}^{N_{\text{оп}}} R_i^2\right).$$

Ее можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \prod_{i=1}^{N_{\text{оп}}} \varphi_R(R_i; \mu) &= \frac{C_{\text{оп}}}{\mu^{N_{\text{оп}}}} \exp\left(-\frac{N_{\text{оп}} \mu_{\text{оп}}}{\mu}\right) = \\ &= L(\mu_{\text{оп}}; \mu), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } C_{\text{оп}} = \prod_{i=1}^{N_{\text{оп}}} R_i;$$

$\mu_{\text{оп}}$ — опытная оценка квадрата РСКО μ .

Оценка

$$\mu_{\text{оп}} = \arg \max_{\mu} \prod_{i=1}^{N_{\text{оп}}} \varphi_R(R_i; \mu) = \frac{1}{2N_{\text{оп}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{оп}}} R_i^2. \quad (3)$$

Она является решением уравнения правдоподобия:

$$\left. \frac{\partial \ln \left[\frac{C_{\text{оп}}}{\mu^{N_{\text{оп}}}} \exp \left(-\frac{1}{2\mu} \sum_{i=1}^{N_{\text{оп}}} R_i^2 \right) \right]}{\partial \mu} \right|_{\mu=\mu_{\text{оп}}} = 0.$$

В соответствии с методом ПОИ для априорной оценки μ_p вводится функция, аналогичная функции (2):

$$L(\mu_p; \mu) = \frac{C_p}{\mu^{N_p}} \exp \left(-\frac{N_p \mu_p}{\mu} \right), \quad (4)$$

где $C_p = \text{const}$;

$$N_p = N_{\text{оп}} v^*;$$

v^* — отношение правдоподобия для проверки статистической гипотезы $H: \mu = \mu_p$, которое определяется по формуле [22]

$$v^* = (\mu_{\text{оп}}/\mu_p)^{N_{\text{оп}}} \exp \left[-N_{\text{оп}} (\mu_{\text{оп}}/\mu_p - 1) \right]. \quad (5)$$

Для определения апостериорной оценки параметра μ составляем функцию

$$\begin{aligned} L(\mu_{\text{оп}}, \mu_p; \mu) &= L(\mu_p; \mu) L(\mu_{\text{оп}}; \mu) = \\ &= \frac{C_{\text{оп}} C_p}{\mu^{N_{\text{оп}} + N_p}} \exp \left(-\frac{N_{\text{оп}} \mu_{\text{оп}} + N_p \mu_p}{\mu} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку функция плотности распределения (1) является регулярной в смысле первой и второй производных по параметру μ [23], апостериорную оценку $\mu_{\text{ПОИ}}$ квадрата РСКО μ определяем из необходимого условия максимума функции $L(\mu_{\text{оп}}, \mu_p; \mu)$:

$$\left. \frac{\partial \ln L(\mu_{\text{оп}}, \mu_p; \mu)}{\partial \mu} \right|_{\mu=\mu_{\text{ПОИ}}} = 0,$$

или

$$\left. \frac{\partial \ln L(\mu_{\text{оп}}; \mu)}{\partial \mu} \right|_{\mu=\mu_{\text{ПОИ}}} + \left. \frac{\partial \ln L(\mu_p; \mu)}{\partial \mu} \right|_{\mu=\mu_{\text{ПОИ}}} = 0.$$

Из последнего уравнения получаем

$$\mu_{\text{ПОИ}} = \frac{N_{\text{оп}} \mu_{\text{оп}} + N_p \mu_p}{N_{\text{оп}} + N_p} = \frac{\mu_{\text{оп}} + v^* \mu_p}{1 + v^*}. \quad (7)$$

Отсюда видно, что в апостериорной оценке $\mu_{\text{ПОИ}}$ параметра μ реализуется взвешенный учет априорной и опытной информации, причем чем ближе априорные данные к результатам натуральных испытаний (чем больше v^*), тем больше их вес в апостериорной оценке.

Можно показать, что выигрыши в числе испытаний и точности оценивания, получаемые за счет учета априорной информации, зависят от ее близости к опытным данным.

Действительно, согласно формуле (6) апостериорную оценку $\mu_{\text{ПОИ}}$ можно рассматривать как оценку, полученную по выборке объемом $N_{\text{ап}} = N_{\text{оп}} + E[v^* N_{\text{оп}}]$, где $E[\dots]$ — функция округления до ближайшего целого числа. Поэтому можно говорить о выигрыше в числе испытаний

$$\delta_{\text{ч.ис}} = E[v^* N_{\text{оп}}],$$

получаемом за счет учета априорной информации, и рассматривать $\mu_{\text{ПОИ}}$ как оценку, полученную по результатам $N_{\text{ап}}$ НИ.

При совпадении оценок μ_p и $\mu_{\text{ПОИ}}$ выигрыш в числе испытаний будет максимальным: $\mu_{\text{ч.ис}} = N_{\text{оп}}$, поскольку $v^* = 1$. В этом случае можно полагать, что апостериорная оценка $\mu_{\text{ПОИ}}$ получена по результатам натуральных испытаний $2N_{\text{оп}}$ опытных образцов.

Выигрыш в точности оценивания может быть определен по формуле

$$\delta_T = D[\mu_{\text{оп}}]/D[\mu_{\text{ПОИ}}],$$

где $D[\dots]$ — оператор дисперсии.

Приближенные значения дисперсий опытной ($\mu_{\text{оп}}$) и апостериорной ($\mu_{\text{ПОИ}}$) оценок параметра μ согласно [22] могут быть определены по формулам

$$\begin{aligned} D[\mu_{\text{оп}}] &\approx \frac{\mu_{\text{оп}}^2}{N_{\text{оп}}}; \\ D[\mu_{\text{ПОИ}}] &\approx \frac{N_{\text{оп}} \mu_{\text{оп}}^2 + N_p \mu_p^2}{(N_{\text{оп}} + N_p)^2} = \frac{\mu_{\text{оп}}^2 + v^* \mu_p^2}{N_{\text{оп}} (1 + v^*)^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда формула, определяющая выигрыш в точности оценивания, получаемый за счет учета априорной информации, принимает вид

$$\delta_T \approx \frac{\mu_{оп}^2 (1 + v^*)^2}{\mu_{оп}^2 + v^* \mu_p^2}.$$

На практике удобно пользоваться более простой формулой. Если предположить, что априорная информация не противоречит опытным данным, т. е. $\mu_{оп} \approx \mu_p$, то из предыдущей формулы получаем

$$\delta_T \approx 1 + v^*. \quad (9)$$

Очевидно, что максимальный выигрыш в точности оценивания $\delta_T = 2$ получается при полном совпадении априорной (μ_p) и опытной ($\mu_{оп}$) оценок, поскольку в этом случае $v^* = 1$.

Апостериорное оценивание параметра μ методом МАВ

Можно заметить, что в постановке задачи отсутствует априорная плотность распределения $\varphi_{\mu}(\mu; \mu_p)$ параметра μ , характеризующего точность СП, а задана лишь точечная оценка μ_p . Поэтому найти апостериорную условную плотность распределения оцениваемого параметра μ в соответствии с формулой Байеса

$$\varphi_{\mu}(\mu/\mu_{оп}; \mu_p) = \frac{\varphi_{\mu}(\mu; \mu_p)L(\mu_{оп}; \mu)}{\int_{\Omega_{\mu}} \varphi_{\mu}(\mu; \mu_p)L(\mu_o; \mu)d\mu} \quad (10)$$

и апостериорную оценку $\mu_{МАВ}$ этого параметра, обеспечивающую максимум условной плотности распределения, не представляется возможным.

Существуют различные подходы к выбору априорного распределения (например, в виде равномерного распределения, наихудшего с некоторой точки зрения распределения, совокупности распределений и т. д.). Получаемые при этом апостериорные оценки в общем случае также отличаются, что существенно затрудняет процессы определения их достоверности и сравнения качества.

Действительно, пусть, например, априорное распределение имеет вид

$$\varphi_{\mu}(\mu; \mu_p) = \frac{1}{\mu_p} \exp\left(-\frac{\mu}{\mu_p}\right), \quad 0 < \mu < \infty. \quad (11)$$

Тогда в соответствии с (10) апостериорное распределение будет иметь вид

$$\varphi_{\mu}(\mu/\mu_{оп}; \mu_p) = \frac{C_{оп}}{C_{\mu_p}} \frac{1}{\mu^{N_{оп}}} \exp\left(-\frac{\mu}{\mu_p} - \frac{N_{оп}\mu_{оп}}{\mu}\right),$$

где $C = \text{const}$.

Из необходимого условия максимума функции $\varphi_{\mu}(\mu/\mu_{оп}; \mu_p)$:

$$\left. \frac{\partial \ln \varphi_{\mu}(\mu/\mu_{оп}; \mu_p)}{\partial \mu} \right|_{\mu=\mu_{МАВ}} = 0,$$

получаем уравнение для определения апостериорной оценки $\mu_{МАВ}$:

$$\frac{\mu_{МАВ}^2}{\mu_p} + N_{оп}\mu_{МАВ} - N_{оп}\mu_{оп} = 0.$$

Решение этого уравнения с учетом положительности параметра μ имеет вид

$$\mu_{МАВ} = \frac{\mu_p}{2} \left(\sqrt{N_{оп}^2 + 4N_{оп} \frac{\mu_{оп}}{\mu_p}} - N_{оп} \right). \quad (12)$$

Если взять другое априорное распределение, например,

$$\varphi_{\mu}(\mu; \mu_p) = \frac{\mu}{\mu_p^2} \exp\left(-\frac{\mu}{\mu_p}\right), \quad 0 < \mu < \infty, \quad (13)$$

то апостериорная оценка $\mu_{МАВ}$ квадрата РСКО в соответствии с методом МАВ будет определяться по формуле

$$\mu_{МАВ} = \frac{\mu_p}{2} \left[\sqrt{(N_{оп} - 1)^2 + 4N_{оп} \frac{\mu_{оп}}{\mu_p}} - (N_{оп} - 1) \right]. \quad (14)$$

Видно, что апостериорная оценка (14) параметра μ отличается от оценки (12). Причиной этого является выбор иного априорного распределения в виде (13). Анализируя оценки (12) и (14), трудно определить, какая из них лучше и как на их качество влияет отличие априорной информации от данных, полученных по результатам НИ.

В то же время применительно к рассматриваемой задаче следует отметить, что можно найти такое априорное распределение, при котором апостериорные оценки $\mu_{ПОИ}$ и $\mu_{МАВ}$ будут совпадать.

В частности, такой результат получается, если в качестве априорного распределения взять функцию

$$\varphi_{\mu}(\mu; \mu_p) = \frac{L(\mu_p; \mu)}{c_1(\mu_p)},$$

$$\text{где } c_1(\mu_p) = \int_{\Omega_{\mu}} L(\mu_p; \mu) d\mu = \frac{C_p \Gamma(N_p - 1)}{N_p^{N_p-1} \mu_p^{N_p-1}} \quad [24].$$

Однако даже в этом случае в методе МАВ остается неопределенной величина N_p .

Таким образом, метод МАВ по сравнению с методом ПОИ имеет ряд недостатков, которые сужают область его применения для апостериорного оценивания характеристик точности СП ОЧ при ограниченном числе НИ.

Иллюстративный пример

Рассмотрим перспективную систему посадки отработавшей ступени (ОС) гипотетической ракеты космического назначения. Специально оборудованный район посадки ОС является круговым с радиусом r_0 . Рассеивание средних точек приземления ОС, оснащенной системой посадки, описывается двумерным нормальным законом распределения, центр которого совпадает с центром РП. Рассеивание является круговым с радиальным среднеквадратическим отклонением $\sigma = \sqrt{\mu}$. Условная вероятность того, что ОС после приземления будет исправной, зависит от расстояния от средней точки приземления до центра РП и определяется по формуле [21]

$$P(\hat{R}) = \begin{cases} 1 & \text{при } R < r_1; \\ (r_2 - R)/(r_2 - r_1) & \text{при } r_1 \leq R \leq r_2; \\ 0 & \text{при } R > r_2, \end{cases} \quad (15)$$

где r_1 и r_2 — некоторые заданные величины, причем $r_2 < r_0$;

\hat{R} — модуль случайного вектора, координатами которого являются отклонения средней точки приземления ОС от центра РП.

По результатам модельных исследований функционирования СП ОС получена априорная оценка μ_p квадрата РСКО μ . Проведены натурные испытания системы посадки восьми однотипных ОС. Расстояния от средних точек приземления ОС до центра РП, характеризующие точность СП, составили R_i , $i = \overline{1, 8}$.

Требуется определить вероятность того, что ОС после ее посадки может быть использована повторно.

Формулу для расчета этой вероятности получаем на основе формулы (15) путем последовательного применения формул умножения вероятностей и полной вероятности [25]:

$$P(\mu) = 1 + \frac{r_1}{r_2 - r_1} \exp\left(-\frac{r_1^2}{2\mu}\right) - \frac{r_2}{r_2 - r_1} \exp\left(-\frac{r_2^2}{2\mu}\right) - \frac{1}{\mu(r_2 - r_1)} \int_{r_1}^{r_2} r^2 \exp\left(-\frac{r^2}{2\mu}\right) dr. \quad (16)$$

В качестве исходных данных, необходимых для оценивания точностных характеристик СП ОС, берем гипотетические величины: $r_0 = 100$ м; $r_1 = 30$ м; $r_2 = 80$ м; $\mu_p = 511$ м² ($\sigma_p = \sqrt{\mu_p} \approx 23$ м); $R_1 = 18,7$ м; $R_2 = 5$ м; $R_3 = 32$ м; $R_4 = 26,2$ м; $R_5 = 62$ м; $R_6 = 86$ м; $R_7 = 17$ м; $R_8 = 4,5$ м.

По результатам натурных испытаний СП определяем в соответствии с формулой (3) оценку максимального правдоподобия $\mu_{оп} = 852$ м² квадрата РСКО μ и оценку $\sigma_{оп} = \sqrt{\mu_{оп}} \approx 29$ м радиального среднеквадратического отклонения σ .

Подстановка опытной ($\mu_{оп}$) и априорной (μ_p) оценок в формулу (5) дает значение $v^* = 0,2874$ отношения правдоподобия.

По формуле (7) рассчитываем апостериорную оценку параметра μ : $\mu_{ап} = 776$ м².

Выигрыш в точности оценивания, получаемый за счет использования априорной информации о характеристиках точности СП ОС, $\delta_T \approx 1,29$, т. е. дисперсия апостериорной оценки примерно в 1,29 раза меньше дисперсии опытной оценки.

Выигрыш в числе испытаний, который дает учет априорной информации, $\delta_{чис} = 2$. Поэтому можно полагать, что апостериорная оценка $\mu_{ап}$ квадрата РСКО μ получена по результатам испытаний 10 опытных образцов в отличие от опытной оценки $\mu_{оп}$, полученной по результатам 8 испытаний.

Подстановка в формулу (16) вместо параметра μ априорной (μ_p), опытной ($\mu_{оп}$) и апостериорной ($\mu_{ПОИ}$) оценок позволяет определить, соответственно, априорное, опытное и апостериорное значения вероятности того, что СП обеспечит возможность повторного использования ОС после ее посадки:

$$P(\mu_p) \approx 0,90; \quad P(\mu_{оп}) \approx 0,78; \quad P(\mu_{ап}) \approx 0,81.$$

Видно, что априорная оценка μ квадрата РСКО μ дает завышенное значение вероятности, а опытная $\mu_{оп}$ — заниженное. При совместной обработке априорной информации и опытных данных получают апостериорную оценку $\mu_{ПОИ}$ и на ее основе уточненное значение вероятности того, что СП обеспечит возможность повторного использования ОС после ее приземления.

Таким образом, применение метода приоритета опытной информации, основанного на взвешенном учете данных, полученных до и после натурных испытаний СП, позволило уточнить один из основных показателей качества применения СП ОС по назначению — квадрат радиального среднеквадратического отклонения, характеризующий точность функционирования СП.

Заключение

Анализ методов, используемых для апостериорного оценивания характеристик СС, показал наличие определенных достоинств у метода при-

оритета опытной информации. Во-первых, он не требует знания априорного распределения исследуемых характеристик, а предполагает наличие их точечных оценок. Во-вторых, в методе ПОИ вес априорной информации в апостериорной оценке изменяется в зависимости от ее близости к опытным данным и, следовательно, отсутствует необходимость проверки всей имеющейся информации на однородность. В-третьих, метод ПОИ позволяет достаточно просто оценить выигрыши в точности и числе испытаний, получаемые за счет учета априорных данных.

При необходимости принятия обоснованных решений о характеристиках СС в условиях ограничений на проведение испытаний их опытных образцов целесообразно использовать метод приоритета опытной информации. Он будет полезен при решении различных задач, связанных с необходимостью принятия решений в условиях ограниченных экспериментальных данных, а также может служить основой для сокращения числа натурных испытаний при их планировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков А. П. и др. Справочник по эксплуатации космических средств. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. Полякова А. П. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2006. — 758 с.
2. Кринецкий Е. И. и др. Летные испытания ракет и космических аппаратов / под ред. Кринецкого Е. И. — М.: Машиностроение, 1979. — 464 с.
3. Александровская Л. Н., Круглов В. И., Кузнецов А. Г. и др. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учеб. пособие. — М.: Логос, 2003. — 736 с.
4. Лобейко В. И., Кислов О. В., Литвинов С. П., Соколов С. П. Анализ существующей системы испытаний вооружения и военной техники на полигоне, научно-методическое обеспечение экспериментальной отработки вооружения и военной техники // Вестник воздушно-космической обороны. 2018. № 3 (19). С. 10—16.
5. Буренок В. М., Найденов В. М. Испытательная база: выход из кризиса // Воздушно-космическая оборона. 2009. № 1 (44). С. 18—25.
6. Фроленков К. В. Уточнение оценок вероятностей при локальном апостериорном выводе алгебраической байесовской сети в случае неточного свидетельства // Труды СПИИРАН. 2013. № 1 (24). С. 152—164.
7. Kahneman D., et al. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. 21st. — Cambridge University Press. 2005. — 555 p.
8. Тулупьев А. Л. Апостериорные оценки вероятностей в алгебраических байесовских сетях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2012. № 2. С. 51—59.
9. Шаракшанэ А. С., Халецкий А. К., Морозов И. А. Оценка характеристик сложных автоматизированных систем. — М.: Машиностроение, 1993. — 272 с.
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для студ. вузов. Изд. 9-е. — М.: Изд. центр "Академия", 2003. — 576 с.
11. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / под ред. Юсупова Р. М.-Л.: Энергия, 1978. — 192 с.
12. Арсеньев В. Н., Лабетский П. В. Метод апостериорного оценивания характеристик системы управления летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 10. С. 23—28.
13. Арсеньев В. Н. Статистический анализатор. Патент России № 2015554. 1994. Бюл. №12.
14. Пустников В. М., Спиридонов С. Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 06. С. 267—287.

15. **Коробов Б. В.** Сравнительный анализ методов определения весовых коэффициентов "влияющих факторов" // Социология: методология, методы, математическое моделирование. 2005. № 20. С. 54—73.
16. **Пугачев В. Н.** Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. — М.: Сов. радио, 1973. — 256 с.
17. **Щербаков П. С.** Использование априорной информации для уточнения оценок параметров // Изв. АН СССР. Автом. и телемех. 1988. № 5. С. 80—89.
18. **Арсеньев В. Н., Силантьев С. Б., Хомоненко А. Д., Ададуров С. Е.** Определение вероятности выполнения задачи сложной системой при ограниченном объеме опытной информации: докл. на XXI Межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2018) в Санкт-Петербурге. 2018. Т. 1. С. 43—46.
19. **Арсеньев В. Н., Силантьев С. Б., Ядренкин А. А.** Использование априорной информации для коррекции модели потока событий в сложной системе // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 5. С. 391—397.
20. **Буряк Ю. И., Скрынников А. А.** Повышение степени обоснованности принимаемых решений в системе распознавания за счет использования априорной информации // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 220 (10). С. 47—54.
21. **Абезгауз Г. Г. и др.** Справочник по вероятностным расчетам. — М.: Воениздат, 1970. — 536 с.
22. **Арсеньев В. Н.** Оценивание характеристик систем управления по ограниченному числу натурных испытаний: — М.: Рестарт, 2013. — 126 с.
23. **Королюк В. С., Портенко Н. И., Скороход А. В., Турбин А. Ф.** Справочник по теории вероятностей и математической статистике. — М.: Физматлит, 1985. — 640 с.
24. **Арсеньев В. Н.** Метод определения закона распределения оценок показателей качества системы // Изв. вузов. Приборостроение. 1991. Т. 34. № 12. С. 10—15.
25. **Арсеньев В. Н., Ардашов А. А., Лабеецкий П. В., Силантьев С. Б.** Оценивание характеристик перспективных образцов ракетно-космической техники по ограниченному числу испытаний: тр. Всеросс. науч.-практ. конф. "Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации". — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. Т. 2. С. 28—33.

JUSTIFICATION OF THE METHOD OF ESTIMATION OF CHARACTERISTICS OF COMPLEX SYSTEMS WITH A LIMITED NUMBER FIELD TESTS

V. N. Arsenyev

Military Space Academy named A. F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russia

D. P. Dubinin

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

The problem of estimating the characteristics of complex systems based on the test results of a limited number of prototypes is considered. It is shown that to make informed decisions about the characteristics of the system it is advisable to use the method of priority of experimental information. One of the main advantages of this method is to take into account the proximity of a priori data to the experimental ones, which virtually eliminates the need to check all available information for homogeneity. It can also serve as a basis for reducing the number of full-scale tests in their planning. An example illustrating the main advantages of the method is given.

Keywords: complex system, characteristics, limited field tests, method of priority of experimental information, gain in evaluation.

Bibliography — 25 references.

Received November 13, 2019

УДК 658.51

МЕХАНИЗМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ "РОСАТОМ"

П. А. Дроговоз, д-р эконом. наук

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

О. Б. Иващенко

АО «Федеральный центр науки и высоких технологий «Специальное научно-производственное объединение «Элерон», Москва, Россия

Проанализированы актуальные принципы производственной системы "Росатом" (ПСР) для крупного производства и имеющиеся пересечения по уже существующим системам. Выделен комплексный инструментарий с проработкой внедрения на производстве, что должно повысить конкурентоспособность компании на рынке производителей. В процессе исследования ранее разработанной системы 5С выделены ключевые мероприятия для обеспечения вспомогательной функции при интеграции ПСР. В целях успешного функционирования разработанной модели предложена методология решения производственных задач, направленная на совершенствование технологических процессов производства, что позволит укрепить позиции компании на рынке промышленных производителей.

Ключевые слова: эффективность, инструментарий ПСР, эффективность производства, развертывание системы 5С, конкурентоспособность, себестоимость.

Эффективное функционирование производства и совершенствование его процессов являются целью каждой компании. Любые мероприятия по совершенствованию производственной деятельности направлены на получение конкретных экономических эффектов. Гетьман В. Г. трактовал данный подход (эффективное функционирование) как "умение правильно делать намеченное", а результативность — как "умение правильно наметить, что делать" [1].

Автор работы [2] утверждал, что в экономике категория "Эффективность" трансформируется в понятие "экономическая эффективность производства" и именно поэтому при ее измерении сопоставляется эффект от экономической деятельности субъектов хозяйствования с затраченными на его получение экономическими ресурсами, которые ограничены и требуют постоянного воспроизводства.

В [3] описана экономическая эффективность как сложная категория экономической науки,

которая охватывает все сферы практической деятельности человека, все стадии общественного производства, выступает основой построения количественных критериев ценности, используется для формирования материально-структурной, функциональной и системной характеристик хозяйственной деятельности.

В эпоху высокой технологичности производств и постоянно возрастающей конкуренции становится стратегически значимым выбор имеющейся (или разработка новой) системы совершенствования и развития производства. Промышленность России весьма разнообразна. Сфера ядерных технологий занимает в ней одну из ключевых (по значимости, доходности, перспективам развития и т. д.) позиций. Выбор стратегии развития данной отрасли является стратегически значимым.

В Госкорпорации "Росатом" разработана система ПСР, реализующая задачи успешного развития отрасли на среднесрочной перспективе как на внутреннем, так и на внешнем рынке.

Сущность ПСР и направления развертывания на производствах Госкорпорации "Росатом"

Государственная корпорация "Росатом" является одним из лидеров рынка ядерной энергетики.

С каждым днем появляются новые технологии, конкуренция на рынке атомных технологий

Дроговоз Павел Анатольевич, профессор, заведующий кафедрой "Предпринимательство и внешнеэкономическая деятельность".

E-mail: drogovoz@gmail.com

Иващенко Олег Борисович, начальник отдела.

E-mail: veknol@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 марта 2020 г.

© Дроговоз П. А., Иващенко О. Б., 2020

постоянно возрастает. Для сохранения лидерских позиций в данном сегменте рынка необходима система улучшения качества и снижения себестоимости выпускаемой продукции. Отсюда стала актуальной задача построения собственной динамичной платформы совершенствования технологических процессов на постоянной основе. Производственная система "Росатома" (ПСР) объединила в себе лучший мировой опыт высокотехнологичных производств и практику бережливого производства.

Каждый сотрудник госкорпорации и тем более руководители всех уровней должны в полной мере владеть инструментами ПСР. С 2015 г. данное условие стало обязательным для профессионального и карьерного роста сотрудников всех уровней [4].

ПСР — это культура бережливого производства и система непрерывного совершенствования процессов обеспечения конкурентного преимущества на мировом уровне [4].

Реализуемые принципы ПСР описаны табл. 1.

С точки зрения управленческой части реализации ПСР на производствах задачами администраторов становятся целые группы вопросов, включающие в себя широчайший набор компетенций.

Обязанности руководителей (декларация о ПСР) [6]:

- быть примером для подчиненных, т. е. на деле участвовать в постоянных улучшениях в работе, задавать высокие стандарты командной работы и эффективного взаимодействия;

- создавать сотрудникам необходимые условия и обеспечивать необходимыми ресурсами для реализации улучшений на рабочих местах в производстве и в офисе;

- совершенствоваться самому и развивать свою команду в соответствии с принципами производственной системы "Росатома";

- поддерживать и стимулировать сотрудников, стремящихся к непрерывному совершенствованию своей и командной работы, к самореализации, профессиональному и карьерному росту;

- отслеживать достижение результата и своевременно обсуждать план дальнейших действий с командой;

- нести персональную ответственность за достижение результата.

Структура и направления совершенствования эффективности производства

Еще несколько лет назад Кириенко С. В. в своем послании руководителям организаций, входящих в периметр управления Госкорпорации "Росатом", ставил задачу по повышению эффективности деятельности подчиненных им предприятий и структур. В кратчайший срок были определены цели и приоритеты "Росатома" в направлении совершенствования производств. Приоритетные направления, объединившие три группы решаемых задач, заключены в комплексном инструментарии ПСР, представленном на рис. 1.

Таблица 1

Актуальные принципы ПСР (разработано авторами на основе [4, 5])

Принцип	Сущность	Примечание
Внимание к требованиям заказчика	Индивидуальный подход, учет требований с учетом специфики каждого заказчика	С точки зрения систематизации актуально распределять заказчиков по типам рынка и объемам продукции
Незамедлительное решение возникающих вопросов	Не оставлять вопрос на следующий этап, решать на месте. По результату проверять на динамике работоспособность предложенного решения	Применяется (особо актуально) при переналадке оборудования, развертывании дополнительного производства и подготовке к выпуску новой продукции
Постоянное повышение качества	Исправлять брак незамедлительно, без дублирования операций и совершения последующих возвратов в предыдущие цеха	Для интеграции уместно вводить мотивирующие положения для сотрудников
Формирование потока ценностей	Систематически совершенствовать деятельность на каждом участке	Поощрять расширение компетенций, вводить короткие обучения новым функциям и т. д.
Стремление к постоянному совершенствованию	Прорабатывать и применять совершенствование процессов на постоянной основе	Показательно поощрять отличившихся сотрудников и проводить обучение по данным процессам



Рис. 1. Комплексный инструментарий ПСР (разработано авторами на основе [4–6])

В эпоху непрерывного совершенствования процессов производства и постоянного технологического совершенствования единичные меры не приведут к улучшениям и созданию положительной динамики на производстве. Лишь комплексный подход, единовременно и в полном объеме интегрируемый в производство, позволит усовершенствовать производство и повысить его эффективность.

Пример комплексного метода приведен на рис. 2.



Рис. 2. Комплексный инструментарий ПСР (разработано авторами на основе [4, 6])

Из данного рисунка становится очевидно, что лишь системный подход по всем направлениям

ПСР является ключом к совершенствованию процессов производства. Комплексная реализация данных направлений нацелена на первоочередные задачи — исключение обременений и потерь. В рамках инструментария ПСР выделяют следующие виды потерь [6]:

- перепроизводство (производство продуктов и услуг в количестве, большем, чем востребовано заказчиком);
- лишние движения (нерациональная планировка рабочей зоны);
- ненужная транспортировка (логистика в потоках, приводящая к дополнительным потерям и затратам);
- излишние запасы (затраты на поддержание ценности запасов: хранение, погрузка, разгрузка и т. д.);
- избыточная обработка (выполнение большего объема работ, чем требуется для заказчика, несовершенство технологических карт);
- ожидание (отсутствие информации, материалов и инструментов в нужный момент на рабочих местах или разбалансированность работ);
- переделка/брак (затраты, возникающие из-за производства продуктов или услуг с дефектами).

Уменьшение и по возможности полное устранение указанных потерь являются первоочередней задачей на начальном этапе реализации инструментария ПСР на любом производстве.

Данные потери далеко не всегда можно уменьшить или устранить одномоментно [7]. Единичные операции поддаются корректировке в определенной (небольшой) степени. Однако ввиду высокой технологичности произ-

водств некоторые вопросы, охватывающие подавляющую часть процесса производства товара, требуют отдельного решения.

Повышение конкурентоспособности за счет снижения себестоимости при сохранении высокого качества и первоначальных характеристик выпускаемой продукции

Мероприятия, направленные на снижение себестоимости и повышение конкурентоспособности, включающие в себя весь комплекс устранения потерь, должны проводиться в рамках отдельной подсистемы. С теоретической точки зрения актуальным будет представление авторского решения (особенности применения 5С, совершенствование технологических процессов, компетенции персонала и т. д.) на конкретных примерах реализации (на прототипах создаваемой продукции).

Программы совершенствования технологических карт производства в первую очередь затрагивают устранение потерь от ожидания, простоев, излишних обработки и движений.

Вопросы технологий, начиная с вопросов размещения оборудования и заканчивая вопросами компетенций сотрудников, занятых самим производством и осуществляющих вспомогательные операции, связаны.

В части вопросов организации труда сотрудников для совершенствования производственных процессов актуально применять инструментальный системы 5С. В развернутом виде систему 5С, ориентированная на особенности отечественного производства, представлена на рис. 3.



Рис. 3. Основные составляющие системы 5С (разработано авторами на основе [8, 9])

Основными задачами, подлежащими решению при применении системы 5С, являются:

- совершенствование управляемости рабочей зоны как на уровне цехов и подразделений, так и на местном, локальном уровне каждого сотрудника, занятого производством;
- повышение культуры производства (внимание к браку и промежуточному качеству, бережное отношение к расходным материалам, заготовкам и т. д.);
- сокращение времени производства отдельных групп товара (достигается за счет реализации первых двух пунктов).

Для успешного решения данных задач также необходима выработка структуры применения и пошаговой реализации инструментария системы 5С на производстве в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Пошаговая реализация инструментария системы 5С на производстве (структурировано авторами на основе [8])

Наименование действия	Суть операции	Примечание
Сортировка инструментов производства	Перераспределить, сдать или убрать неиспользуемый инструмент на данном участке производства (сектор, цех)	Ненужные на данном участке инструменты ведут к беспорядку, захламлению и возможной путанице
Соблюдение установленных правил порядка на производстве	Распределение необходимого инструмента в соответствии с технологической последовательностью его применения	Данный подход позволит сократить время выполнения технологических операций на участке работ без ухудшения качества. Достигается за счет приобретения навыка сотрудником в короткий срок
Содержание в чистоте рабочего места	Создание комфортных условий на рабочем месте и реализация требований безопасности труда	Актуально на многих площадках, детали зависят от этапа (цеха) работ
Стандартизация операций	Стандартизация всех улучшений, проведенных в процессе работы	Перевод данного действия в систематику для постоянного совершенствования работы
Непрерывное совершенствование	При применении нового инструмента разбиения работ на этапы и последовательность постоянно стремиться к совершенствованию участка работы	Особо важно при выделении из серийного производства изделий под индивидуальные заказы и отдельные требуемые характеристики изделия, выполненного на базе серийной продукции

На производствах Госкорпорации "Росатом", действуя в соответствии с табл. 2 и методами, изложенными в данной работе, возможно в весьма короткий срок повысить эффективность производства продукции. Специфика производства и нюансы применений показаны на примере АО "ФЦНИВТ "СНПО "Элерон".

С учетом высокого уровня технологичности производства становится актуальным вопрос решения проблем, возникающих при интеграции описанных подходов и методов.

На основе изложенного материала методологию решения производственных задач с одновременным достижением максимального экономического эффекта от проводимых мероприятий целесообразно реализовывать в соответствии с рис. 4.

Выстроенная последовательность решения возникающих производственных проблем содержит дополнения по каждому этапу, что способствует детализации решаемой задачи и достижению требуемого экономического эффекта от реализуемых мероприятий.



Рис. 4. Методология решения производственных задач (разработано авторами на основе [4—6, 10])

ЛИТЕРАТУРА

1. Гетьман В. Г. Современный бухгалтерский учет и его проблемы / под ред. Гетьмана В. Г., Блиновой У. Ю., Герасимовой Л. Н. — М., 2014. — 152 с.
2. Воронов В. В. Оценка и факторы роста инновационной конкурентоспособности регионов Латвии // Балтийский регион. 2012. № 4 (14). С. 7—21.
3. Алещенко В. В. Малый бизнес: пространственное развитие и приоритеты государственной политики // ЭКО. 2014. № 11 (485). С. 132—141.
4. Производственная система "Росатома", презентационный материал [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rosatomflot.ru/img/all/0_psr_booklet14_preview__1_.pdf (дата обращения: 30.10.2019).
5. Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом" (Госкорпорация "Росатом"), официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rosatom.ru/about/system/> (дата обращения: 29.10.2019).
6. АО "Производственная система "ПСР" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ps-rosatom.ru> (дата обращения: 27.10.2019).
7. Вумек Д. П., Джонс Д. Т. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. Изд. 2. / Пер. с англ. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. — 470 с.
8. Академия "Росатома", презентационные материалы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ps-rosatom.ru/files/5C2.pdf> (дата обращения: 29.10.2019).
9. ГОСТ Р 56020-2014 Бережливое производство. Основные положения и словарь. — М.: Стандартинформ, 2014.
10. Вумек Д. П., Джонс Д. Т. Бережливое обеспечение. Как построить эффективные и взаимовыгодные отношения между поставщиками и потребителями / Пер. с англ. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. — 264 с.

MECHANISMS TO IMPROVE HIGH-TECH PRODUCTION BASED ON ROSATOM PRODUCTION SYSTEM

P. A. Drogovoz

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

O. B. Ivashchenko

Joint Stock Company "Federal Center for Science and High Technologies "Special Scientific and Production Association "Eleron", Moscow, Russia

Having analyzed the current principles of AKP for large production and the existing intersections on existing systems, the author highlighted a comprehensive tool with the study of implementation in production, which should increase the competitiveness of the company in the market of producers. During the study of the previously developed 5C system, key activities were identified to provide a support function in the integration of the AKP. In order to successfully operate the developed model, the author's methodology of solving production problems aimed at improving the technological processes of production is proposed, which will allow to strengthen the company's position in the market of industrial producers.

Keywords: efficiency, AKP tools, production efficiency, 5C system deployment, competitiveness, cost.

Bibliography — 10 references.

Received March 17, 2020

УДК 004.056

СИНТЕЗ ОБЛИКА ОБРАЗЦА ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ НА ЭТАПАХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ

Т. О. Усатенко

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

Рассмотрены стадии жизненного цикла (ЖЦ) образцов вооружения и военной техники (ОВВТ), представляющих собой сложную техническую систему, состоящую из разных по своему составу и назначению систем, подсистем и агрегатов. Проведен анализ облика ОВВТ как полноценно связанных функционального, информационного и морфологического описаний, позволяющих формировать перечень сведений об образцах, подлежащих защите на этапах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Ключевые слова: стадии жизненного цикла изделия, образцы вооружения и военной техники, этапы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, облик образца вооружения и военной техники.

Образец вооружения и военной техники (ОВВТ) является сложной технической системой, состоящей из различных по своему составу и назначению систем, подсистем и агрегатов и проходящей в своем развитии следующие стадии жизненного цикла (ЖЦ) изделия [1]:

- исследование и обоснование разработки;
- разработка;
- производство;
- эксплуатация;
- капитальный ремонт (для изделий, подлежащих капитальному ремонту).

На указанных стадиях ЖЦ решаются, соответственно, следующие основные задачи:

- определение типа каждого элемента ОВВТ на основе анализа целей, стоящих перед разрабатываемым образцом, и его характеристик;
- определение параметров каждого проектируемого агрегата, входящего в состав разрабатываемого ОВВТ, исходя из оценки его эффективности в целом;
- создание элемента ОВВТ, соответствующего требованиям конструкторской документации при ограничении материально-временных затрат в условиях конкретной производственной базы;
- обеспечение работоспособности ОВВТ и обеспечение готовности к применению по целевому (боевому) назначению;

- технически возможное и экономически целесообразное восстановление свойств ОВВТ, изменяющихся при эксплуатации.

Анализ этапов, целей и задач, решаемых на стадиях ЖЦ ОВВТ, показал, что первые две стадии (исследование и обоснование разработки и разработка изделия) приходятся на этапы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), на которых закладываются принципы построения, технические решения, перспективы развития, способы применения и условия боевого (целевого) применения ОВВТ (рис. 1) [2] и формируют сведения, позволяющие с высокой степенью точности определить его облик.

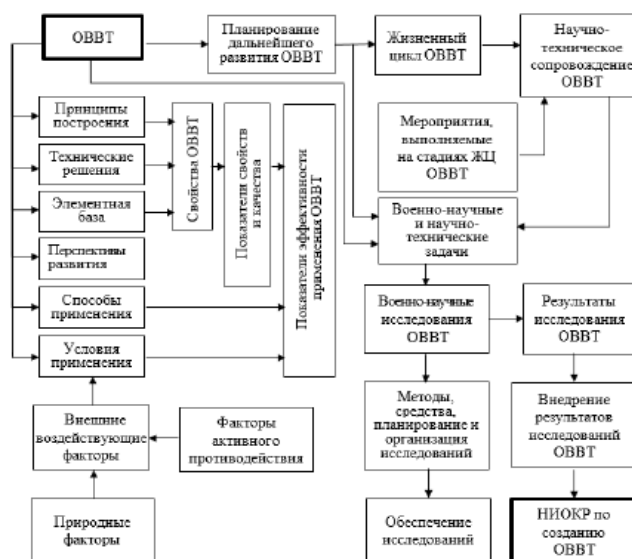


Рис. 1. Основные области военно-научной деятельности, определяющие направления исследования ОВВТ на этапах НИОКР

Усатенко Тимур Олегович, преподаватель.
E-mail: Brat-sin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 марта 2020 г.

© Усатенко Т. О., 2020

В соответствии с [3] облик ОБВТ может быть представлен в виде трех полноценных взаимосвязанных описаний: функционального, морфологического и информационного (рис. 2).



Рис. 2. Связь между видами описания ОБВТ

Функциональное описание ОБВТ позволяет выявить функции (предназначение) ОБВТ, оценить его отношение к другим объектам, связи ОБВТ с внешней средой, определить функции, проявляющиеся при его взаимодействии с другими объектами. Следует отметить, что функциональное описание ОБВТ иерархично.

Такой способ описания позволяет определить функциональные связи между свойствами, взаимодействующими со средой элементов (подсистемами низшего уровня), и эффективностью ОБВТ.

Функциональное описание ОБВТ S_{Φ} может быть задано следующим множеством:

$$S_{\Phi} = \{T, x, C, Q, y, \varphi, \eta\},$$

где T — множество моментов времени;
 x — множество мгновенных значений входных воздействий;
 $C = \{c: T \rightarrow x\}$ — множество допустимых входных воздействий;
 c — элементарное входное воздействие;
 Q — множество состояний;
 y — множество значений выходных величин;
 φ — переходная функция;
 η — выходное отображение.

Морфологическое описание ОБВТ дает представление о его строении и не может быть исчерпывающим. Глубина описания, уровень детализации, т. е. выбор элементов, внутри которых описание не проникает, определяются назначением описания.

Морфологическое описание ОБВТ S_M может быть задано следующим множеством:

$$S_M = \{\Sigma_M, V, \sigma, Z\},$$

где $\Sigma_M = \{\Sigma_j\}$ — множество элементов ОБВТ и их свойства (под элементом при этом понимаются компоненты ОБВТ низшего уровня детализации, либо подсистема, внутри которой описание не проникает);

$V = \{V_r\}$ — множество связей между элементами ОБВТ;

σ — структура ОБВТ;
 Z — композиция.

Информационное описание определяет зависимость морфологических и функциональных свойств ОБВТ от качества и количества внутренней (о себе самой) и внешней (поступающей из среды) информации. Частные аспекты информационного описания могут касаться отдельных процессов и подпроцессов, множество частных описаний с большей или меньшей полнотой охватывает факторы организации функционирования ОБВТ.

Информационное описание системы $S_{\text{И}}$ можно задать следующим множеством:

$$S_{\text{И}} = \{\Sigma_{\text{И}}, \Lambda, \mu, N, \varepsilon\},$$

где $\Sigma_{\text{И}} = \{I_{\text{вход}}, I_{\text{вых}}, I_{\text{внут}}\}$ — множество элементов входной, выходной и внутренней информации и их свойства;

$\Lambda = \{\Lambda_p\}$ — множество связей между элементами информации;

μ — структура информации;

N — множество носителей информации;

ε — энтропия информации об ОБВТ.

При этом формирование облика ОБВТ заключается в последовательной разработке его функционального, информационного и морфологического описания, позволяющего последовательно определять тактико-технические характеристики ОБВТ, его технический облик, элементы в его составе. В конечном итоге формируется перечень сведений об ОБВТ, подлежащих защите на этапах НИОКР.

На основании проведенного анализа облика ОБВТ на этапах НИОКР можно сделать следующие выводы:

- первые две стадии ЖЦ ОБВТ (исследование и обоснование разработки, и разработка изделия) приходятся на этапы проведения НИОКР, на которых формируются сведения о нем, позволяющие с

высокой степенью точности определить его облик;

- формирование облика ОБВТ заключается в последовательной разработке его функционального, морфологического и информационного описаний, позволяющих формировать перечень сведений об образце, подлежащих защите на этапах НИОКР.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ РВ 15.004-2004 Военная техника. Стадии жизненного цикла изделий и материалов. Введ. 01.01.2006. — М.: Стандартиформ, 2006. — 12 с.
2. Демидов Б. А., Луханин М. И., Величко А. Ф., Науменко М. В. Системная методология планирования развития, предпроектных исследований и внешнего проектирования вооружения и военной техники. — К.: ИД "Стилос", 2011. — 464 с.
3. Карпов В. В., Мельник В. А., Батяй А. Н. Разработка научно-методических рекомендаций по формированию перечня сведений о техническом образце, подлежащих защите на этапах проведения НИОКР // Вестник Российского нового университета. 2012. № 4. С. 106—109.

SYNTHESIS OF THE APPEARANCE OF A SAMPLE OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT AT THE STAGES OF RESEARCH AND DEVELOPMENT

T. O. Usatenko

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

The article considers the stages of the life cycle of a sample of weapons and military equipment, which are a complex technical system consisting of systems, subsystems and aggregates that differ in their composition and purpose. The analysis of the appearance of a sample of weapons and military equipment as fully related functional, informational and morphological descriptions that allow you to create a list of information about this sample, subject to protection at the stages of research and development work.

Keywords: product life cycle stages, samples of weapons and military equipment, stages of research and development work, appearance of a sample of weapons and military equipment.

Bibliography — 3 references.

Received March 11, 2020

УДК 658.5

ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ ПВО

М. Е. Дьячков; П. А. Кобелев

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», г. Рязань, Россия

Рассмотрены особенности системы сервисного обслуживания вооружения и военной техники ПВО с точки зрения организации производства. Описаны основные стадии производственного процесса. Выявлены проблемные вопросы, при решении которых необходимо применять инструменты планирования. Представлена усовершенствованная методика оперативно-производственного планирования, позволяющая решить возникшие проблемы и добиться повышения качества производственного процесса.

Ключевые слова: оперативно-производственное планирование, сервисное обслуживание, вооружение и военная техника, ПВО, производственный процесс, диспетчирование, календарный план.

Поддержание боеготовности вооружения и военной техники (ВВТ) является важнейшим аспектом укрепления безопасности России в современных военно-политических условиях. Большую роль при этом играют зенитно-ракетные комплексы противовоздушной обороны сухопутных войск (ПВО СВ). Всему миру известны такие отечественные разработки, как ЗРК "Бук", "Оса", "Тунгуска", система С-300В и т. д., разработанные еще в 80-х гг. XX в [1]. Данные комплексы представляют собой сложные радиоэлектронные системы, позволяющие обнаруживать и поражать различные типы воздушных целей на различной дальности. Ввиду большого срока эксплуатации требуется осуществлять периодическое сервисное обслуживание данных систем на местах их дислокации, которое включает в себя ремонтные работы и техническое обслуживание.

Согласно ГОСТ РВ 0101-001-2007 сервисное обслуживание изделия военной техники — 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.

В сервисное обслуживание могут входить все виды технического обслуживания и все виды ремонта изделия военной техники, гарантийный и технический надзор при эксплуатации изделия военной техники, работы по гарантийным обязательствам сервисной организации, работа 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 осуществления работ по обслуживанию ВВТ ПВО созданы специальные организации (сервисные центры), работающие на контрактной основе с Министерством обороны РФ. Применяя системный подход, сервисное обслуживание представляется как производственная система, в которой функционирует производственный процесс. Для обеспечения его непрерывности и ритмичности необходимо применение инструментов оперативного управления производством, таких как оперативно-произ-

Дьячков Максим Евгеньевич, аспирант.

E-mail: ya_max@inbox.ru

Кобелев Петр Андреевич, аспирант.

E-mail: kblv.pa@gmail.com

Шевченко Роман Викторович, заместитель главного инженера.

E-mail: srv3000@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2020 г.

© Дьячков М. Е., Кобелев П. А., Шевченко Р. В., 2020

водственное планирование и диспетчирование [3].

В данной работе проанализирована методика планирования, применяемая в сервисных центрах, показаны ее недостатки и предложена новая методика, разработанная с учетом необходимости решения некоторых проблемных вопросов.

Производственный процесс сервисного обслуживания ВВТ ПВ

Любой производственный процесс имеет свои входы, выходы и стадии. В общем виде стадии производственного процесса сервисного обслуживания ВВТ ПВО представлены на рис. 1.

Входами процесса являются контракт, план-график проведения работ и оперативные уведомления Заказчика (Министерство обороны РФ), которые поступают на рассмотрение планово-диспетчерского отдела (ПДО) предприятия. Соответственно на первой стадии производственного процесса осуществляется анализ документов, регламентирующих номенклатуру обслуживаемых изделий, сроки проведения работ, их стоимость и т. д. В этот период осуществляется деловая переписка предприятия с Заказчиком для урегулирования разногласий и двустороннего подписания входных документов производственного процесса.

Далее производственный процесс переходит ко второй стадии — подготовке производства, на которой осуществляются материально-техническое обеспечение проводимых работ (обеспечение запасными частями, инструментом, спецодеждой и т. д.), финансово-экономическая подготовка производства (подсчет себестоимости единицы продукции, оценка планируемой величины оборотных производственных фондов и т. д.). Производственным подразделением осуществляется деловая переписка с воинской частью о ее готовности принять специалистов для проведения сервисного обслуживания, производится формирование состава выездной бригады и оформление необходимых документов.

На выходе данной стадии производственного процесса производственным подразделением подтверждается готовность воинской части к проведению работ по сервисному обслуживанию и выдается техническое задание руководителю комплексной бригады.

Третья и четвертая стадии производственного процесса подразумевают непосредственное проведение работ в эксплуатирующей организации и сдачу этих работ Заказчику, в результате чего на выходе получают изделия ВВТ, соответствующие требованиям эксплуатационной документации (ЭД), и платежные документы, подтверждающие факт и цену выполненных работ.

Оперативно-производственное планирование производственного процесса сервисного обслуживания ВВТ ПВО СВ

При заключении контракта на выполнение работ сторонами подписывается план-график проведения сервисного обслуживания на календарный год, который является отправной точкой в планировании основных работ предприятия. Таким образом, Заказчик (обычно в лице Министерства обороны РФ) навязывает сервисному центру жесткие рамки проведения сервисного обслуживания ВВТ по заключенному госконтракту.

Исходя из подписанного плана-графика работ на календарный год ПДО предприятия на плановый период осуществляет составление планов проводимых работ на основании предложений от производственного подразделения, являющегося держателем контракта. Данные предложения строго связаны с утвержденным планом-графиком проведения работ по сервисному обслуживанию и учитывают работы по оперативным уведомлениям Заказчика. Также в них указывают планируемые сроки завершения работ, если они будут завершены в плановом периоде. На основании полученных предложений ПДО формирует календарный план основных работ на календарный период (месяц, квартал) и

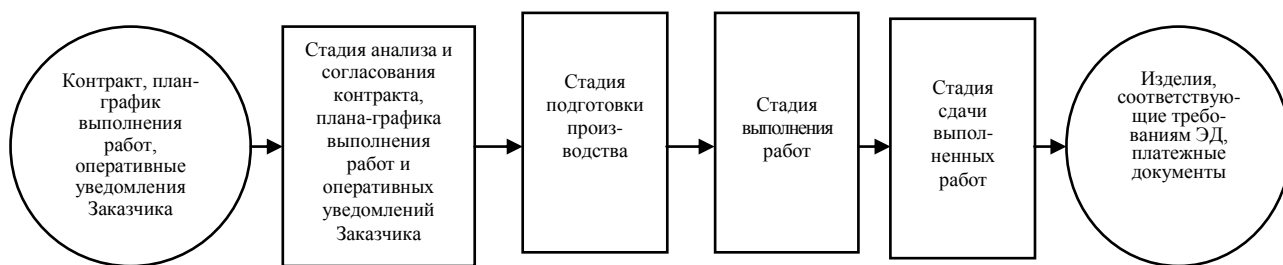


Рис. 1. Стадии производственного процесса сервисного обслуживания ВВТ ПВО

выдает производственному подразделению выписку из него для принятия к исполнению. В этом состоит суть оперативно-календарного планирования (ОКП) как части ОПП производственного процесса сервисного обслуживания ВВТ ПВО [4].

Диспетчирование работ как вторую часть ОПП ПДО сервисного центра осуществляют посредством контроля за выполнением календарного плана проведения работ, выдачи оперативных поручений производственным подразделениям и проведения оперативных совещаний по проблемным вопросам.

Приведенная методика оперативно-производственного планирования, используемая предприятиями отрасли, показывает свою низкую эффективность как инструмента управления ходом производственного процесса. Рассмотрим подробнее основные проблемы в сфере сервисного обслуживания вооружения, которые могут быть решены посредством усовершенствования методики ОПП.

Наиболее острыми проблемами сервисного обслуживания ВВТ на предприятиях отрасли являются следующие.

- Отсутствие информации в сервисном центре о техническом состоянии изделий ВВТ в эксплуатирующих организациях. Нерешенность данного вопроса приводит к невозможности составления детального производственного плана на календарный период ввиду отсутствия каких-либо прогнозов о возможности восстановления указанной в первичном плане-графике проведения работ номенклатуры изделий. Это может привести к выезду бригады специалистов на место дислокации изделия, ремонт которого невозможен в условиях воинской части, а все затраты (командировочные расходы, заработная плата) в этом случае понесет предприятие.

- Отсутствие производственных запасов покупных изделий, узлов, агрегатов, радиоэлементов. Так как все закупки по гособоронзаказу привязаны к конкретному контракту, предприятие ставится в жесткие рамки целевого назначения закупок запасных частей и материалов. Иными словами, если на обслуживаемом изделии после его дефектации появляется необходимость замены какого-либо узла, работы по сервисному обслуживанию прерывают и запускают механизм закупки новой детали, что может продолжаться от трех месяцев до года ввиду сложности поиска поставщиков, процедуры торгов и т. д. В итоге велика вероятность появления новых отказов на обслуживаемом изделии при возобновлении ремонтных работ через длительный период времени [5].

Решение приведенных проблем осуществимо посредством совершенствования методики ОПП

на предприятии. Создание базы данных о техническом состоянии образцов ВВТ обслуживаемой номенклатуры во всех эксплуатирующих организациях, заполняемой посредством мониторинга технического состояния, способствует решению первой из них [6]. Исходными данными для этого процесса являются акты выполненных работ предыдущих периодов, письменные запросы в воинские части, информация от бригадиров комплексных бригад.

На основании тех же исходных данных можно осуществлять накопление статистических данных о наиболее часто выходящих из строя узлах и агрегатах и осуществлять их закупку с момента начала действия государственного контракта или за счет собственных средств предприятия для формирования производственного запаса. Это приведет к решению второй из изложенных проблем.

Перечисленные усовершенствования должны затрагивать как внутрицеховой, так и межцеховой уровни планирования. В результате появляется новая методика ОПП, общий алгоритм работы которой приведен на рис. 2.

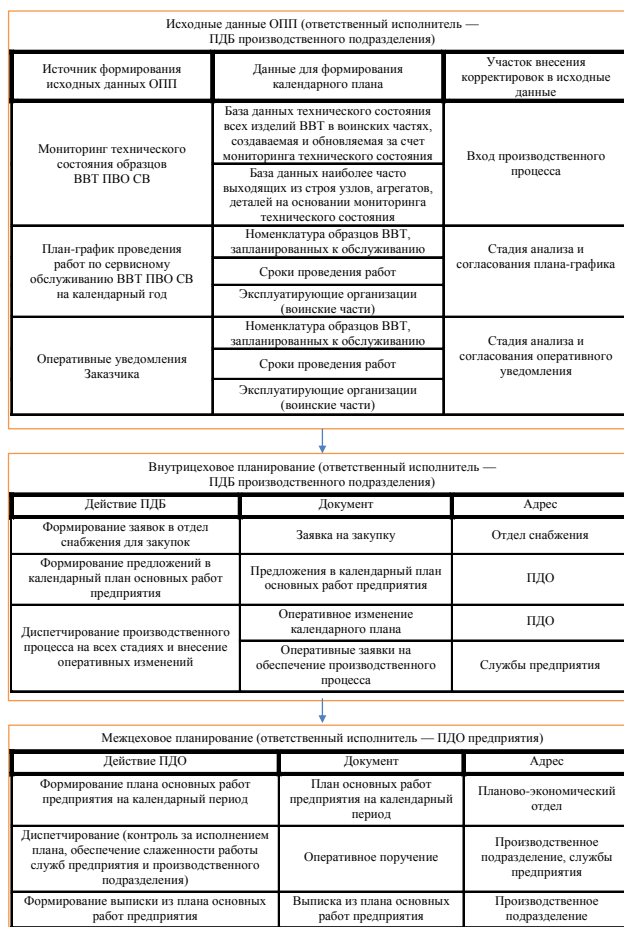


Рис. 2. Усовершенствованная методика ОПП производственного процесса сервисного обслуживания ВВТ ПВО

Согласно предлагаемой авторами методике к входным данным производственного процесса необходимо добавить данные мониторинга технического состояния образцов ВВТ в войсковых частях Российской Федерации. Благодаря этим данным можно вступать в разногласия с Заказчиком по вопросу согласования плана-графика проведения работ или исполнения оперативных уведомлений. Например, можно уведомить Министерство обороны о невозможности проведения сервисного обслуживания на конкретном изделии ввиду того, что оно выработало свой ресурс и по своему техническому состоянию требует проведения ремонта в заводских условиях. Информация об этом изделии будет получена предприятием благодаря данным мониторинга, что позволит на стадии анализа плана-графика и оперативных уведомлений корректировать входные данные производственного процесса посредством урегулирования протоколов разногласий.

Имея скорректированные исходные данные, можно приступить к формированию календарного плана на определенный период. На внутрицеховом уровне производственно-диспетчерское бюро (ПДБ) формирует предложения к плану основных работ предприятия, заявки для формирования производственных запасов на основании данных мониторинга и передает все это в ПДО предприятия, которое утверждает поступившие предложения, формирует план основных работ предприятия и предоставляет выписку из него в производственное подразделение.

Немаловажной составляющей ОПП является диспетчирование (или оперативное регулирова-

ние) хода работ. Из приведенной схемы видно, что данная процедура должна осуществляться как на внутрицеховом, так и на межцеховом уровнях планирования. ПДБ производственного подразделения оперативно решает разного рода проблемы, возникающие на всех стадиях производственного процесса, а ПДО предприятия осуществляет контроль за исполнением календарного плана и обеспечивает слаженную работу производственного подразделения со вспомогательными службами.

Конечным результатом работы системы ОПП является план основных работ предприятия на календарный период, который передается в планово-экономический отдел для расчета экономических показателей.

Заключение

Рассмотренная методика оперативно-производственного планирования позволит сократить финансовые потери предприятия от незавершенных или невыполненных работ, повысить точность краткосрочного прогнозирования товарного выпуска продукции, повысить ритмичность работы всех структурных звеньев, задействованных в производственном процессе. В конечном итоге это приведет к повышению качества проводимых сервисным центром работ и росту удовлетворенности потребителя.

Для ускорения процесса оперативно-производственного планирования необходимо реализовать данную методику в виде автоматизированной информационной системы со встроенным электронным документооборотом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пьянков А. А.** Экономико-математическая модель системы ремонта вооружения и военной техники в современных условиях // Вооружение и экономика. 2013. № 3 (24). С. 65—76.
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: мат. XXI Междунар. науч.-практ. конф. "Технические науки: проблемы и решения". — М.: Интернаука, 2019. № 3 (19). С. 53—59.
4. **Дьячков М. Е., Кобелев П. А., Четвергов В. А., Шевченко Р. В.** Распределение трудовых ресурсов при планировании деятельности производственного подразделения в системе сервисного обслуживания вооружения и военной техники: мат. XXX междунар. науч.-практ. конф. "Технические науки: проблемы и решения". — М.: Интернаука, 2019. № 12 (28). Ч. 1. С. 139—144.
5. **Кобелев П. А., Дьячков М. Е., Шевченко Р. В.** Проблемы функционирования системы сервисного обслуживания вооружения и военной техники: мат. XXII Междунар. науч.-практ. конф. "Технические науки: проблемы и решения". — М.: Интернаука, 2019. № 4 (20). С. 96—101.
6. **Пьянков А. А.** Основные проблемы планирования и управления развитием системы вооружения применительно к существующей системе технического обеспечения Вооруженных Сил // Вооружение и экономика. 2015. № 1 (30). С. 23—34.

SCHEDULING OF ARMY AIR DEFENSE WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT MAINTENANCE PRODUCTION PROCESS

M. E. Dyachkov, P. A. Kobelev

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

This article deals with the features of maintenance system of army air defense weapons and military equipment from the position of organization of manufacture. The main stages of the production process are described and the problematic issues requiring the use of planning tools are identified. For this purpose, an improved scheduling technique, which allows solving these problems and improves the quality of the production process, has been developed.

Keywords: scheduling, maintenance, weapons and military equipment, Army air defense, production process, dispatching, schedule.

Bibliography — 6 references.

Received February 9, 2020

УДК 621.374.33

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ПОВТОРИТЕЛЕЙ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ОБРАТНОЙ ЗАДЕРЖАННОЙ СВЯЗЬЮ И ДРОБНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ

А. В. Шильцин; Д. В. Марков; К. В. Латышев; Д. Б. Петленко, канд. техн. наук
Российский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия

Представлены методы решения радиотехнической проблемы, связанной с необходимостью многократного излучения сверхкороткого импульса для восстановления отраженного от цели радиоизображения методами стробоскопической регистрации. Показаны радиофотонные схемы повторителей импульсов, реализуемые на принципах обратной задержанной связи и дробного мультиплексирования. Построены программные модели повторителей в среде Simulink, позволяющие исследовать и оценивать эффективность данных устройств. Показано, что схемы повторителей, реализуемые на принципах обратной задержанной связи и дробного мультиплексирования, могут решить проблемную необходимость многократного зондирования объектов сверхкороткими импульсами для получения радиоизображения цели.

Ключевые слова: строб-фрейм-дискретизатор, сверхкороткий импульс, электрооптический повторитель, обратная задержанная связь, дробное мультиплексирование.

Освоение субнаносекундного диапазона открывает новые возможности при исследовании радиофизических свойств материальных сред в задачах лазерной волновой оптики и электродинамики ввиду того, что относительная сверхширокополосность субнаносекундных импульсов позволяет эффективно исследовать по импульсным характеристикам параметры облучаемых сред и поверхностей объектов [1]. Научный интерес к радиоволновым особенностям формоизменения отраженных от облучаемых поверхностей или прошедших через различные среды ультракоротких лазерных импульсов либо радиоимпульсов субнаносекундного диапазона делает актуальным вопрос поиска скоростных методов приема сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов в целях их восстановления и дальнейшей цифровой обработки.

Работа посвящена построению новых методов формовременной рекуперации СКИ в задачах их

скоростной оцифровки путем добавления в такие системы электрооптического повторителя, обеспечивающего дробное клонирование СКИ.

Используемая в работе технология строб-фрейм-дискретизации (СФД) исключает недостатки аналогового приема, в том числе высокочастотное тактирование СКИ-сигнала для взятия цифровых отсчетов [2]. Это уменьшает энергопотребление электронной системы, повышает быстродействие и теоретически обеспечивает бесконечно малое, а практически — пикосекундное разрешение во времени, что соответствует частоте дискретизации сигнала до 100 Гвыб/с. В то же время сверхскоростные АЦП параллельного преобразования способны обеспечивать до 3 Гвыб/с, а стробоскопические осциллографы — до 40–80 Гвыб/с при полосе пропускания существенно ниже предельной частоты Найквиста.

Описание исследуемой модели строб-фрейм-дискретизатора

Предлагаемая модель СФД ранее была реализована в программной среде Simulink [3]. Модель состоит из генератора импульсов заданной формы, массива элементарных линий временной задержки сигнала, массива счетчиков, компаратора и системы вывода результатов [4]. Так, на рис. 1 представлены 4 ключевых функциональных блока.

Шильцин Артем Викторович, аспирант.

E-mail: adaptox@gmail.com

Марков Денис Васильевич, аспирант.

E-mail: d3301100@yandex.ru

Латышев Кирилл Валерьевич, аспирант.

E-mail: kirillius@protonmail.com

Петленко Дмитрий Борисович, доцент.

E-mail: petlenko@mirea.ru

Статья поступила в редакцию 10 мая 2020 г.

© Шильцин А. В., Марков Д. В., Латышев К. В., Петленко Д. Б., 2020

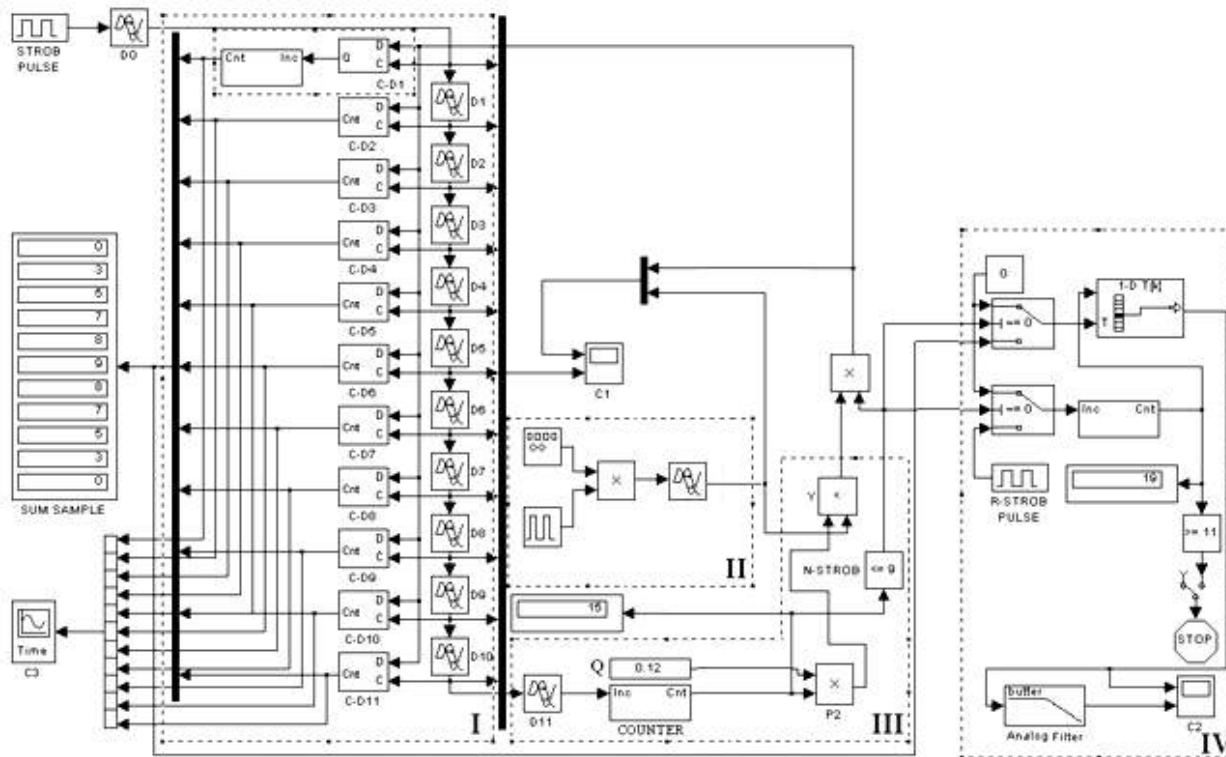


Рис. 1. Модель СФД в среде Simulink:

I — массив линий задержек и счетчиков; II — генератор сигналов заданной формы и повторитель субнаносекундных импульсов; III — компаратор; IV — система вывода результатов

Основным недостатком этой модели является необходимость стробоскопического приема для восстановления сигнала после отражения от исследуемого объекта. При этом импульс излучается столько раз, сколько уровней компаратора необходимо для восстановления СКИ [5].

В качестве зондирующего СКИ выбран биполярный гауссовский импульс длительностью 500 пс (рис. 2), профиль которого имеет вид

$$s(t) = t \exp(-at^2), \quad t \geq 0. \quad (1)$$

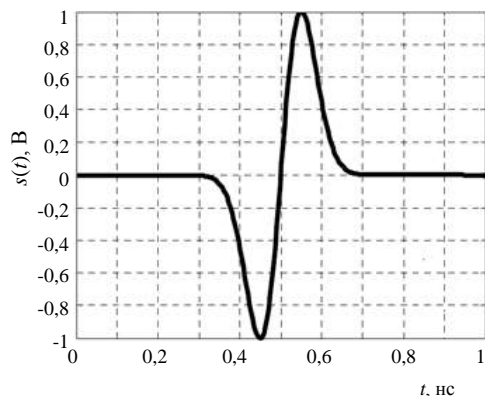


Рис. 2. Биполярный гауссовский импульс

Для оценки силы корреляционной связи между эталонным и восстановленным импульсами используем таблицу Чеддока.

Таблица Чеддока

Количественная мера тесноты связи	Качественная характеристика силы связи
0,1–0,3	Слабая
0,3–0,5	Умеренная
0,5–0,7	Заметная
0,7–0,9	Высокая
0,9–0,99	Весьма высокая

Коэффициент корреляции между эталонным и восстановленным импульсами рассчитаем по формуле

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2)$$

Модель электрооптического повторителя СКИ с обратной задержанной связью

Одним из решений радиотехнической проблемы, связанной с необходимостью многократного излучения сверхкороткого импульса для восстановления отраженного от цели радиоизображения методами стробоскопической регистрации, может стать увеличение числа компараторов до такого, которое обеспечит восстановление СКИ. Однако это ведет к необходимости добавления линий задержек и счетчиков к каждому компаратору, что приведет к резкому увеличению количества элементов. На практике это может означать десятки и даже сотни отдельных идентичных схем, аналогичных той, которая представлена на рис. 1, что неприемлемо для практической реализации.

Также нельзя решить проблему при помощи каскада линий задержки, аналогичных тем, которые используют в СФД для получения отсчетов, только равных длительности фрейма [6]. Это обусловлено тем, что даже самые современные СВЧ-линии задержки имеют неодинаковое ослабление сигнала на разных частотах, причем чем выше частота, тем больше вносимое затухание, а значит, и искажение СКИ-сигнала.

Авторами предложено при помощи электрооптического модулятора (рис. 3) преобразовать СКИ в инфракрасный оптический диапазон, где удастся избежать проблем с различным затуханием в полосе частот СКИ-сигнала, как это происходит даже в самых совершенных микрополосковых линиях задержки.

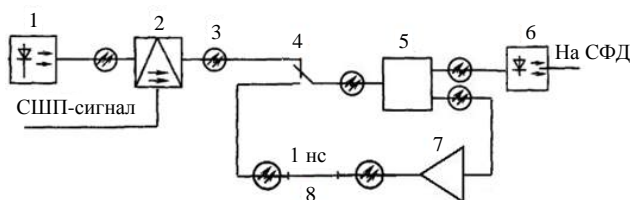


Рис. 3. Электрооптическая модель повторителя СКИ с обратной задержанной связью.

- 1 — источник оптического сигнала; 2 — электрооптический модулятор; 3 — волоконно-оптическая линия связи; 4 — оптический ключ; 5 — делитель оптического сигнала; 6 — фотодетектор; 7 — оптический усилитель; 8 — оптическая линия задержки

В этой схеме оптическую несущую предполагается промодулировать СКИ-сигналом при помощи электрооптического модулятора Маха—Цандера. Далее предполагается воспроизвести уже оптический импульс при помощи цепочки, состоящей из усилителя, который будет усиливать входящий сигнал до величины, необходимой для оцифровки СКИ, линии задержки, рав-

ной длине фрейма, делителя оптического сигнала, где половина его идет на фотодетектор, а другая половина снова усиливается и задерживается во времени (рис. 4).

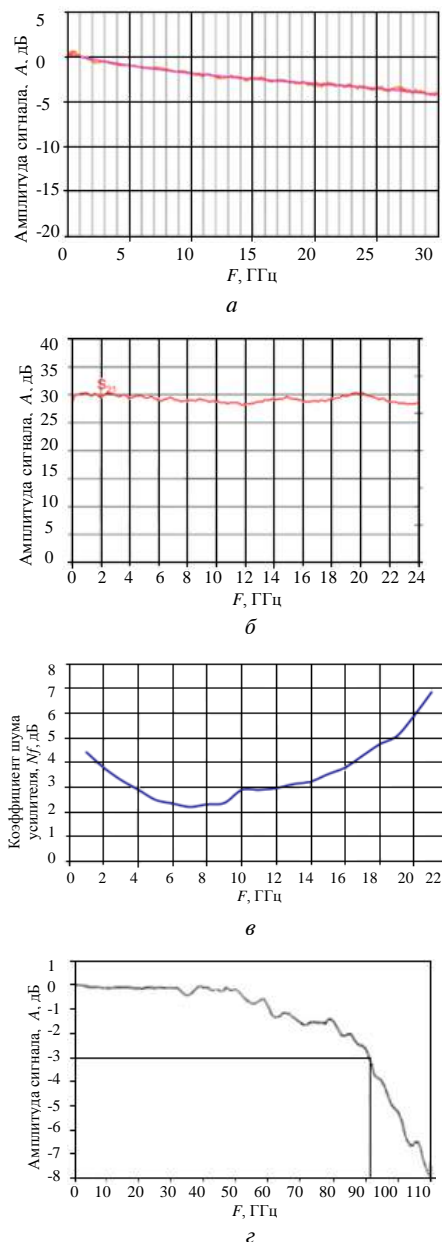


Рис. 4. Характеристики используемого в модели электрооптического повторителя приборов:

- а — АЧХ электрооптического модулятора Маха—Цандера; б — АЧХ оптического усилителя; в — коэффициент шума усилителя; г — АЧХ фотодетектора

Преимуществом этой схемы являются относительная простота и минимальное число оптических элементов.

Недостатком является накопление с течением времени внутренних шумов схемы, прежде всего собственных шумов усилителя.

При моделировании этой схемы (рис. 5) прием частотные искажения, вносимые модулятором Маха—Цандера, оптическим усилителем и фотодетектором, незначительными, так как в выбранном диапазоне до 2 ГГц они не превышают 1 дБ. Коэффициент шума усилителя прием равным 4 дБ.

Моделирование будем проводить при различных отношениях сигнал/шум (ОСШ) для отраженного от исследуемого объекта сигнала (рис. 6).

Модель электрооптического повторителя СКИ с дробным мультиплексированием

В этой схеме оптическую несущую предполагается промодулировать СКИ-сигналом при помощи электрооптического модулятора Маха—Цандера (рис. 7). Далее предполагается усилить сигнал и при помощи делителей оптического

потока и линий задержки с временем задержки, равным $(1, \dots, n)T_d$ (T_d — время фрейма), получить последовательность из n одинаковых СКИ, повторяющихся через период T_d .

Преимуществом данной схемы по сравнению с предыдущей является отсутствие накапливания внутренних шумов и искажений через обратную связь. Недостаток такого решения состоит в общей громоздкости схемы: схема становится малоэффективной при числе линий задержки более 100. Эту проблему можно решить при помощи установки обратной связи, как в первой схеме.

При моделировании этой схемы (рис. 8) снова прием частотные искажения, вносимые модулятором Маха—Цандера, оптическим усилителем и фотодетектором, незначительными, так как в диапазоне до 2 ГГц они составляют не более 1 дБ (рис. 9). Коэффициент шума усилителя прием равным 4 дБ.

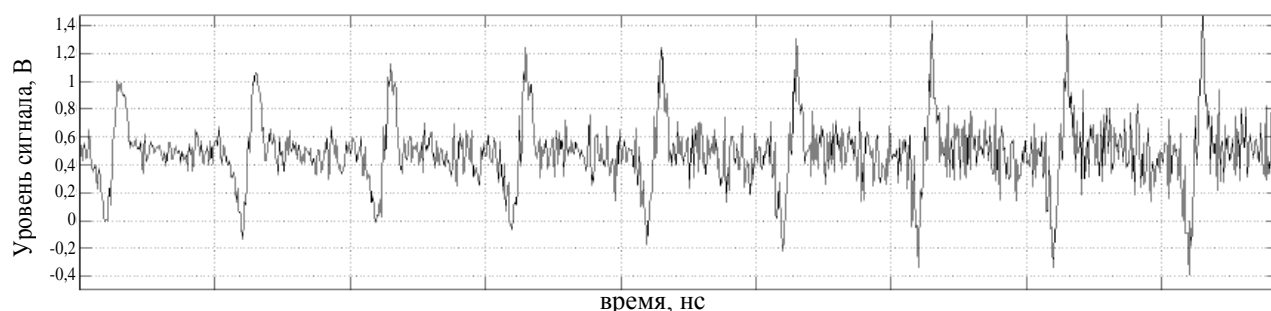


Рис. 5. Результат реализации СКИ для схемы с задержанной обратной связью

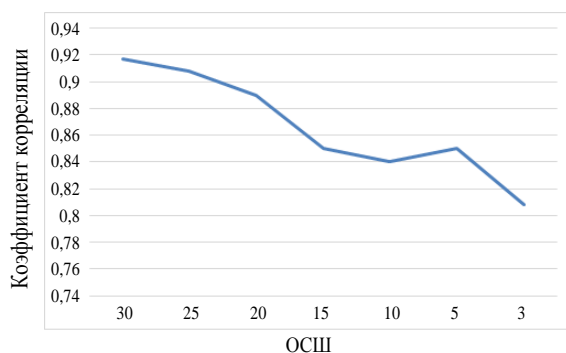


Рис. 6. Зависимость коэффициента корреляции между исходным и восстановленным сигналами от ОСШ на входе СФД

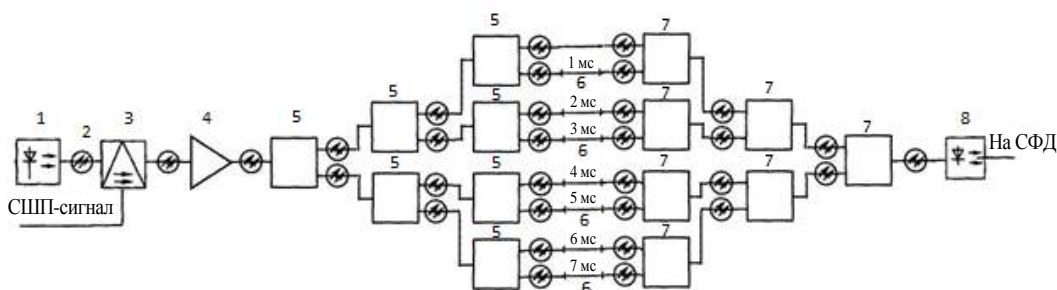


Рис. 7. Модель электрооптического повторителя СКИ с дробным мультиплексированием:

- 1 — источник оптического сигнала; 2 — волоконно-оптическая линия связи;
- 3 — электрооптический модулятор; 4 — оптический усилитель; 5 — делитель оптического сигнала;
- 6 — оптическая линия задержки; 7 — оптический мультиплексор; 8 — фотодетектор

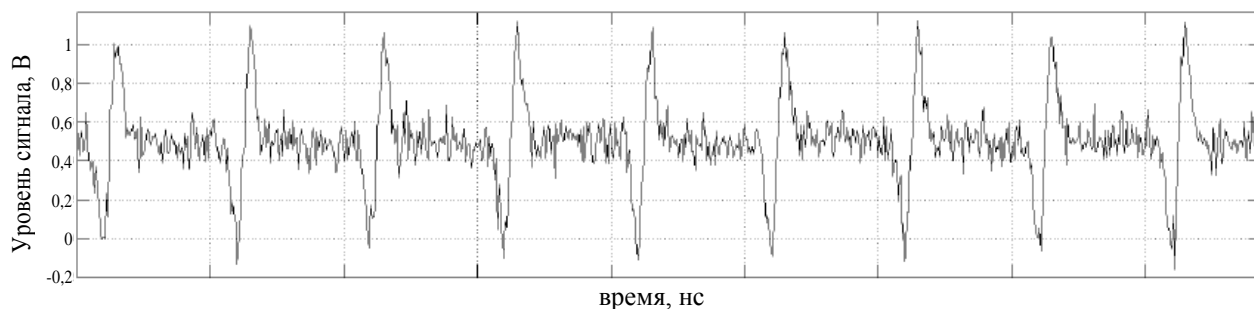


Рис. 8. Результат реализации СКИ для схемы с дробным мультиплексированием

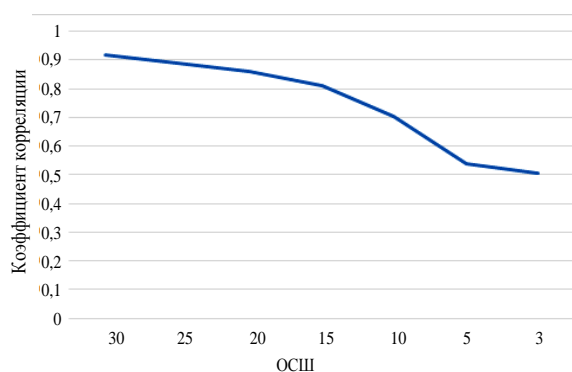


Рис. 9. Зависимость коэффициента корреляции между исходным и восстановленным сигналами от ОСШ на входе СФД

Заключение

Из результатов моделирования в среде Simulink можно сделать вывод о том, что при больших ОСШ построенные оптические схемы работают почти идентично, однако при уровнях ОСШ = 15 дБ и менее схема с дробным мультиплексированием показывает лучшую воспроизводимость исходного сигнала за счет того, что не усиливает повторно внутренние шумы усилителя в отличие от схемы с задержанной обратной связью. Преимуществом схемы с задержан-

ной обратной связью является ее простота в отличие от схемы с древовидной конфигурацией включения оптических линий задержек, в которой увеличение числа клонирования СКИ ведет к сложному построению схемы (рис. 10).

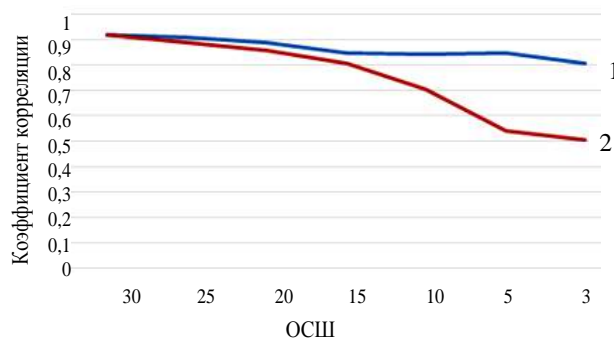


Рис. 10. Зависимость коэффициента корреляции между исходным и восстановленным сигналами от ОСШ на входе СФД в схемах с дробным мультиплексированием (1) и в схеме с задержанной обратной связью (2)

В то же время если удастся решить проблему с многократным усилением внутренних шумов оптического усилителя, то такая схема будет предпочтительней. В связи с этим предполагается бороться с внутренними шумами в схеме с задержанной обратной связью при помощи метода дифференциального приема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будагян И. Ф., Костин М. С. Технология высокоскоростной оцифровки радиоимпульсов субнаносекундного диапазона: сб. публ. по мат. IV Межд. науч.-практ. конф. "Достижения и проблемы современной науки". — СПб.: Научный журнал "Globus", 2015. С. 83—87.
2. Будагян И. Ф., Костин М. С. Фрейм-дискретизация сверхкороткоимпульсных сигналов: сб. науч. тр. II Межд. науч.-практ. конф. "Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем". — М.: МГТУ МИРЭА, 2015. Ч. 1. С. 393—398.
3. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании: полное руководство пользователя. — М.: Солон-Пресс, 2005. — 592 с.
4. Будагян И. Ф., Костин М. С. Субнаносекундная радиоволновая виброметрия. Методы и технологии. — Саарбрюккен, Германия: Palmarium Academic Publishing GmbH&Co. KG, 2015. — 107 с.
5. Костин М. С., Бойков К. А. Циклогенеративные системы атактовой оцифровки субнаносекундных радиоимпульсов в радиовидении // Инженерная физика. 2018. № 1. С. 41—47.
6. Будагян И. Ф., Костин М. С., Шильцин А. В. Строб-фрейм-дискретизация радиоимпульсов субнаносекундного диапазона // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 5. С. 486—492.

MODELING OF ELECTRO-OPTICAL REPEATERS OF SUBNANOSECOND PULSES WITH REVERSED RETAINED COMMUNICATION AND FRACTIONAL MULTIPLEXING

A. V. Shiltsin, D. V. Markov, K. V. Latyshev, D. B. Petlenko

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

This article presents some methods which solve the radiotechnic problem, which connected with need of multiple radiation of an ultrashort pulse to reconstruct a radio-image reflected from the target using methods stroboscopic registration. Radiophotonic pulse repeater scheme which are realized on the principles of inverse delayed communication and fractional multiplexing are shown. Built software models of repeaters in the Simulink environment, which allow to investigate and evaluate the effectiveness of these devices. It is shown that repeater circuits implemented on the principles of inverse delayed communication and fractional multiplexing can solve the problematic necessity of multiple probing of object with ultrashort pulse to receiving a target radioimage.

Keywords: strobe-frame sampler, ultrashort pulse, electro-optical repeater, inverse delayed communication, fractional multiplexing.

Bibliography — 6 references.

Received May 10, 2020

УДК 681.5

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

А. А. Жиленков, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

С. Г. Черный, канд. техн. наук

Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрено несколько приложений нейронных сетей для синтеза интеллектуальных антенных решеток и интеллектуального синтеза, контроля, испытаний и управления.

Ключевые слова: автоматизация, контроль, управление, синтез, производство, интеллектуальный, нейронная сеть.

В активных фазированных антенных решетках [1, 2] используют фиксированный набор антенных элементов, сигналы которых, суммируясь, формируют подвижную диаграмму направленности, которая может быть направлена к цели.

Эта характеристика делает антенну "умной" и сводит к минимуму влияние шума, помех и других проблем, которые ухудшают качество сигнала. Ожидается, что внедрение технологий интеллектуальных антенн в будущих беспроводных системах окажет значительное влияние на эффективное использование спектра, минимизацию затрат на создание новых беспроводных сетей, оптимизацию качества обслуживания и реализацию прозрачной работы в высокотехнологичных беспроводных сетях [3–8], а главное, будет способствовать переходу на качественно новый уровень автоматизации в контроле, испытаниях и управлении как в производстве подобных систем, так и в их эксплуатации.

Концепция интеллектуальных антенн состоит в том, чтобы использовать диаграммы направ-

ленности базовой станции, которые не являются фиксированными, но адаптируются к текущим условиям канала связи. Технологии интеллектуальных антенных систем включают интеллектуальную динамическую фазированную решетку, цифровое формирование луча, адаптивные антенные системы [9, 10].

Высокие скорости обработки информации и способность к обучению искусственных нейронных сетей (ИНС) можно применять для решения многочисленных сложных задач оптимизации контроля и управления в антенных решетках. Присущие нелинейности, связанные с диаграммами направленности антенн, делают антенны подходящими кандидатами для обработки их сигналов средствами ИНС.

Использование ИНС также перспективно в решении проблем проектирования фазированных антенных решеток [5].

Автоматизация процесса контроля неисправностей в антенных решетках

Автоматизированная система компенсации потери элементов решетки. Антенные решетки, используемые в сонарах, радарх и других приложениях связи, содержат несколько сотен излучающих элементов, поэтому отказ одного или нескольких элементов является в достаточной степени вероятным событием и в случае возникновения должен быть устранен. Отказ элемента в антенных решетках нарушает симметрию

Жиленков Антон Александрович, доцент, заведующий кафедрой "Морская электроника".

E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

Черный Сергей Григорьевич, заведующий кафедрой "Электрооборудование судов и автоматизация производства", доцент кафедры "Комплексное обеспечение информационной безопасности".

E-mail: sergiiblack@gmail.com

Статья поступила в редакцию 5 марта 2020 г.

© Жиленков А. А., Черный С. Г., 2020

и вызывает недопустимое искажение диаграммы направленности. В [11] описано несколько методов компенсации потери функционирующих элементов решетки. Данные методы компенсации применимы при условии доступности информации о количестве и положении неисправных элементов.

Проблема автоматизации поиска неисправных элементов. Активные антенны включают системы калибровки для выявления поврежденного элемента или элементов. Эти системы обеспечивают простой способ управления компонентами комплекса активных фазированных решеток (АФАР), но такой контроль невозможен, если система калибровки также повреждена. Теоретически такая проблема может быть решена с помощью многослойного персептрона (МСП), обученного с использованием алгоритма обратного распространения [12]. Отказы элементов приводят к резким колебаниям напряженности поля через апертуру массива, увеличивая как боковые лепестки, так и уровень пульсаций мощности.

Автоматизация процесса идентификации позиций неисправных элементов без вывода объекта из эксплуатации. Для автоматизации контроля с определением положения неисправных элементов в массиве может быть использован МСП. Нейронная сеть на МСП позволяет создать отображение между "поврежденными" диаграммами направленности и положением неисправных элементов в решетке. При этом МСП использует диаграмму направленности в качестве входного сигнала и выдает положение неисправных элементов в качестве выходного сигнала. Это является преимуществом МСП, подразумевающим отсутствие необходимости в экспериментальной установке. Чтобы генерировать обучающие данные для МСП, моделируют диаграммы направленности решетки для ряда случаев местоположения неизлучающих элементов. "Поврежденные" направленности излучения генерируются для случаев наличия в решетке одного, двух и трех неисправных элементов. Таким образом накапливаются обучающие наборы данных для тренировки МСП. Моделирование диаграмм для случайных комбинаций неисправных элементов оправдано, поскольку в большинстве случаев невозможно узнать весь паттерн поврежденных элементов решетки в процессе ее эксплуатации. При таком подходе МСП может обучаться в режиме обратного распространения ошибки, что обеспечивает высокую адаптивность автоматизированной системы.

Сравнительный анализ методов автоматизации поиска неисправных элементов АФАР. В [11]

приведено сравнение ряда методов, позволяющих определять количество и местоположение дефектных элементов в массивах, таких как метод Вудворда–Лоусона [13], искусственные нейронные сети (ИНС) и генетический алгоритм (ГА). В работе показано, что метод Вудворда–Лоусона может обеспечивать хорошие результаты при наличии множества измерений как амплитуды, так и фазы "поврежденной" диаграммы направленности излучения решетки. Поэтому применимость данного метода на практике существенно ограничена.

В [14] предлагается использовать ИНС для построения отображения между "поврежденными" диаграммами направленности и положением неисправных элементов в массиве, которое выполняется с использованием МСП, обученного в режиме обратного распространения ошибки.

ГА также может обеспечивать хорошие результаты, причем даже с ошибками измерения, но его вычислительные затраты высоки. Теоретически значительное снижение затрат возможно за счет применения экспертной системы, позволяющей уменьшить количество рассматриваемых комбинаций дефектных элементов решетки. Подобную экспертную систему можно реализовать на ИНС, в таком случае обеспечивающую выбор набора кандидатов на дефектные элементы, т. е. выполнять функцию предобработки (прореживания) данных перед передачей их в систему, реализующую ГА.

Преимущество использования ИНС состоит в том, что они позволяют исключить итеративные процессы при наличии надлежащим образом обученной сети. Кроме того, метод ГА требует как исходной диаграммы направленности, так и измерения поврежденной диаграммы направленности базовой станцией. Таким образом, первый вариант в большей мере подходит для построения автоматизированной системы поиска неисправных элементов АФАР без вывода последней из эксплуатации.

Подавление помех в зоне покрытия. ИНС, например с МСП-архитектурой, может быть успешно использована для подавления некоторых видов помех в зоне покрытия диаграммы направленности антенной решетки, если известно их положение. Архитектура используемого МСП позволяет подавлять некоторые помехи в зоне покрытия диаграммы направленности антенной решетки, когда известно направление к помехе.

МСП ИНС недооценены как средство получения обратного уравнения диаграммы направленности плоской антенны. Этот метод может быть использован для дальнейшего исследова-

ния в области средств и методов автоматизации систем диагностики неисправностей решетки с применением измеренных значений амплитуды дальнего поля решетки, входного сопротивления и взаимной связи элементов. Методы, базирующиеся на использовании МСП ИНС, перспективны для антенн, постоянно или длительное время развернутых в космосе и под водой, и для любых других условий, требующих применения дорогостоящих средств измерения ближнего и дальнего поля.

Полностью автоматизированные умные антенные решетки на основе искусственной нейронной сети с обучением. Искусственная нейронная сеть с обучением на основе радиальных базисных функций (ИНС-РБФ) [14] является универсальным методом аппроксимации нелинейных отображений. Нейроны РБФ могут обучаться быстрее, чем в МСП, благодаря применению двухступенчатой процедуры обучения. ИНС-РБФ может быть обучена с учителем и без него и в теории обеспечит отличные результаты при моделировании препятствий, определении направления на источник сигнала (НИС) и формировании луча АФАР.

Моделирование препятствий в автоматизации технологического процесса синтеза массивов. На практике излучающие системы не работают в условиях свободного пространства. Препятствия, окружающая среда или механическая структура антенны могут изменять ее свойства, так что результаты процесса синтеза не полностью соответствуют модели. Традиционные подходы к синтезу основаны на различных приближениях, таких как множитель антенной решетки, которые подразумевают отсутствие взаимодействия между излучающими элементами. В реальной излучающей системе эффекты взаимного влияния между элементами решетки изменяют их индивидуальные радиационные свойства и, следовательно, глобальную диаграмму направленности. Если эти эффекты не учтены, в модели возникают ошибки. Учет этих ошибок позволяет обеспечить переход к автоматизации технологического процесса синтеза массивов.

Проектирование одно- и двумерных антенных решеток. ИНС-РБФ можно использовать для определения весов одно- (1-D) и двумерных (2-D) антенных решеток. В современных системах полезные и помеховые сигналы постоянно изменяют свое направление. Следовательно, необходима система быстрого отслеживания целей с адаптацией в реальном времени диаграммы направленности антенны для направления лучей на цели и источники, создающие помехи. При

таком подходе вычисление оптимальных весов может быть выполнено с использованием трехслойной ИНС-РБФ [15]. Результаты, полученные в этой сети, превосходно соответствуют решению уравнения Винера.

Применение ИНС в системах автоматической идентификации направления источника сигнала. Стандартные алгоритмы формирования луча антенны, такие как одноимпульсные, требуют калиброванных антенн, поскольку качество таких алгоритмов зависит от степени идентичности характеристик антенных элементов. Эти алгоритмы плохо работают с антеннами, для которых не полностью известны их фактические физические параметры или не известны текущие изменения данных параметров. По мере того как антенны с фазированной решеткой становятся больше и более тесно интегрируют в физические структуры, требование однородности приводит к резкому повышению затрат на производство и обслуживание, которые становятся все более непомерными для многих военных и гражданских применений. Подход с применением ИНС может решить эту проблему, позволяя строить системы автоматической идентификации параметров АФАР и процессов управления в системах с ними.

Архитектура автоматизированной системы формирователя луча на базе ИНС включает предварительную обработку входных данных измерения антенны, искусственную нейронную сеть и последующую обработку выходных данных. Предварительная обработка с применением ИНС использует накопленные об антенне данные для улучшения входов АФАР, что также обеспечивает переход к интегрированному управлению функционированием системы с АФАР. Она удаляет нерелевантную информацию, устраняет искусственные разрывы в пространстве функции входа и сокращает входные данные до небольшого набора соответствующей информации. Обычные методы с ИНС, как правило, создают более крупные и медленные сети, чем те, которые используют интеллектуальную предварительную обработку. Соответственно следует выбирать архитектуру ИНС, демонстрирующую свою успешность в аппроксимации непрерывных функций из небольшого набора выборок. Таким образом, по мере увеличения количества входов (большая антенна) размеры слоев сети должны расти пропорционально без включения дополнительных слоев.

В литературе утверждается, что архитектура сети РБФ удовлетворяет всем указанным требованиям. В [15] предлагаемая архитектура трехслойной ИНС-РБФ состоит из входного уровня,

скрытого уровня гауссовых RBF и выходного уровня узлов суммирования. Входные узлы принимают предварительно обработанные данные антенны и транслируют входные векторы каждому узлу скрытого слоя.

В радиопеленгаторах, следящих за одной целью (РОИ), можно обучить один выходной узел ИНС для генерации на его выходе значения, пропорционального углу направления источника излучения (отражения). После процесса обучения сеть может предсказать поведение антенны в точках между точками обучения путем обобщения.

Сравнение двух разновидностей нейронной ИНС-РБФ — адаптивной (АРБФ), которая использует обучение с оптимизацией градиентного спуска, и сети на основе линейной алгебры (LinNET), которая обучается с использованием метода ошибки с наименьшим средним квадратом (МНК), — показывает, что выход АРБФ в отличие от LinNET сходится к практически оптимальному решению за несколько итераций.

Автоматизация процесса оценки направления источника сигнала. Оценка направления источника сигнала (НИС) от мобильных целей с применением линейных антенных решеток очень сложна и требует большого количества вычислений. Чтобы уменьшить вычислительную сложность алгоритмов, обеспечивающих сверхразрешение, например классификации множественных сигналов (MUSIC), проблему оценки НИС рассматривают как отображение, которое может быть смоделировано с использованием подходящей ИНС, обученной парами вход—выход.

Интеллектуальная антенна с одновременной идентификацией параметров нескольких целей. Проблема идентификации нескольких целей и автоматизации процесса слежения за ними может быть решена с применением интеллектуальных антенн, включающих систему обработки на базе ИНС. Алгоритм нейронного слежения за несколькими целями (Н-НС) основан на архитектуре семейства ИНС-РБФ и может обеспечить как обнаружение, так и оценку НИС. Поле обзора антенной решетки разделено на пространственные угловые секторы, которые назначены различным парам ИНС-РБФ. Когда сеть первого звена обнаруживает одну или несколько целей, соответствующие сети второго звена активируются для выполнения оценки НИС. Весовые коэффициенты обновляются с применением метода Винера, полученного из оцененного пространственного спектра. Кроме того, алгоритм MUSIC позволяет оценивать НИС в шуме. Этот подход основан на разделении поля обзора антенной решетки на угловые простран-

ственные секторы и последующем обучении каждой сети на первом этапе алгоритма для обнаружения сигналов, исходящих от источников в этом секторе. Как только этот первый этап выполнен, одна или несколько сетей второго звена (оценка НИС) могут активироваться для оценки точного местоположения целей (источников сигналов).

Синтез антенной решетки с учетом эффекта взаимной связи ее элементов. Традиционные методы синтеза антенных решеток, как правило, используют информацию о множителях решетки с применением подходов, основанных на описании идеальных излучающих элементов без учета эффектов взаимного влияния между ними. Учет взаимного влияния между элементами антенной решетки увеличивает сложность задач синтеза, поэтому обычно не реализуется, что приводит к появлению ошибки в решении. Эта ошибка может быть неприемлемой в ряде конструкций антенных решеток.

Синтез неоднородных антенных решеток. ИНС может связать диаграмму направленности с напряжениями, которые должны быть приложены к каждому излучающему элементу, не делая никаких предположений и не требуя знаний о геометрии антенны. Этот подход может решить проблемы неоднородных антенных решеток даже с учетом эффектов взаимного влияния между элементами решетки. В [16] предложена модель ИНС-РБФ для синтеза линейного массива из восьми неравномерно распределенных диполей разного размера и двух полуволновых пассивных диполей, расположенных на концах структуры.

Преимущество синтеза на основе ИНС заключается в его расширении до синтеза неоднородных антенных решеток. Набор напряжений, приложенных к портам антенной решетки, связан с распределением поля, излучаемого структурой. ИНС может точно аппроксимировать неизвестную функцию посредством процесса обучения с использованием сгенерированных пар вход—выход. Эта концепция приводит к новому подходу к проблеме, в которой не требуется рассматривать конкретную геометрию. Если антенна может быть проанализирована с использованием эффективного инструмента, способного учитывать реальные свойства конструкции, может быть создан набор обучающих пар. Этот набор можно использовать для адаптации внутренних параметров ИНС. Затем данная ИНС сможет выполнять задачи синтеза для массивов произвольной геометрии.

Интеллектуальные антенные решетки на основе ИНС Хопфилда. Архитектура ИНС Хопфилда (ИНСХ) представляет собой однослойную пол-

носвязную ИНС с симметричными связями. Данная ИНС имеет связанную энергетическую функцию, которую сеть стремится минимизировать.

Автоматизированная система слежения на базе ИНСХ. Идентификацию параметров на основе сети Хопфилда можно использовать для построения автоматизированных систем слежения с помощью фазированной решетки. Система слежения на базе ИНС использует динамическую оптимизацию для последовательной оценки состояния системы и не требует предварительной статистической информации о шуме.

Адаптивное формирование луча с расширением спектра по методу прямой последовательности. Адаптивное формирование луча является надежным средством улучшения приема желаемого сигнала и защиты систем связи от помеховых сигналов. Данный метод позволяет формировать множество лучей. При этом основной луч направляют в сторону желаемого сигнала, другие лучи — в направлении многолучевого сигнала, а нулевые — в направлении помеховых сигналов.

Гибридные вейвлет-нейронные сети в системах автоматизации процессов

ИНС и методы реконструкции источника. Как было показано, недостаток традиционных методов синтеза антенных решеток состоит в том, что они, как правило, работают с информацией о множителях решеток без учета эффектов взаимодействия между элементами антенны. Это упущение вызывает определенную ошибку в результирующей диаграмме направленности, а требуемые характеристики системы могут не достигаться на практике. Точность методов синтеза может быть улучшена путем учета физических взаимосвязей между напряжениями диполей решетки и соответствующими диаграммами направленности. Этот подход чрезвычайно сложен и обычно не принимается во внимание проектировщиками. Решение на основе ИНС позволяет избежать увеличения сложности расчетов путем аппроксимации взаимосвязи между желаемой диаграммой направленности и напряжениями в реальной антенне. В большинстве практических случаев технические характеристики дают в виде набора параметров или шаблонов излучения дальнего поля (ДП). ИСН не способны обрабатывать информацию о системе с таким количеством степеней свободы без каких-либо дополнительных ограничений, но комбинация ряда методов может превратить спецификации в

определенный эквивалент излучения ближнего поля (БП), а затем — в напряжения. Подобный трехэтапный метод был предложен авторами работы [16].

На первом этапе метода применяют процедуру обучения ИНС, в которой используют метод полноволнового анализа, основанный на методе моментов (ММ) и моделировании проводящих элементов (МПМ), так что ИНС может связывать шаблоны БП с напряжениями, которые их генерировали.

На втором этапе метода для получения набора электрических или магнитных токов, способных генерировать диаграмму направленности, соответствующую заданным спецификациям, используют эквивалентный метод восстановления источника. Полученные токи используют для расчета значений БП-шаблонов.

На третьем этапе обученные ИНС обеспечивают вывод информации на основе ранее рассчитанных данных БП [16].

Этот метод работает непосредственно с конструктивными параметрами антенной решетки без какого-либо упрощения свойств излучающих элементов. Следовательно, в данном методе не предполагается упрощение и приближение важных физических явлений, и, как следствие, решения получают крайне точными. Кроме того, использование напряжений вместо идеальных параметров возбуждения или физических токов позволяет напрямую реализовать синтезированную реальную антенну.

Автоматизация технологических процессов производства антенных решеток с применением ИНС и ГА. ИНС и методы ГА могут быть объединены в новом гибридном методе, позволяющем решать задачи синтеза и производства антенных решеток с пассивными элементами, чья диаграмма направленности определяется эффектами связи между ее активным и пассивным элементами. Комбинация обоих методов улучшает результаты, демонстрируемые при применении только ИСН, а также сокращает время вычислений, требуемое ГА.

Для автоматизации производства широкополосных элементов антенной решетки с конической прорезью с идентификацией параметров разработаны гибридные модели на базе ИНС и ГА. ИНС используют для аппроксимации сложных взаимосвязей между ключевыми индикаторами эффективности решетки, т. е. активным коэффициентом отражения и параметрами ее элементов. Обученные модели ИНС комбинируют с ГА для оптимизации параметров элементов для заданной рабочей полосы частот без использования крайне требовательных к вычисли-

тельными ресурсам систем моделирования электромагнитных (ЭМ) полей. Результаты оптимизации показывают, что применение модели ИНС-ГА может сохранять точность систем моделирования ЭМ-полей при одновременной демонстрации высокой вычислительной эффективности.

Интеллектуальная поддержка процессов управления производством решеток с учетом эффектов взаимной связи с применением вейвлет-нейронных сетей. Выходами сети являются значения распределения амплитуды и фазы элементов антенной решетки. Конкретный алгоритм ИНС с одним скрытым слоем, основанный на функциях активации вейвлета и обученный на примерах, сгенерированных методом Орчарда–Эллиотта, представлен в [17]. Этот алгоритм учитывает эффект взаимной связи в линейной матрице диполей с шаблоном диаграммы. Алгоритм позволяет определять возбуждения и длины диполей в решетке. Применяется количественная оценка близости между желаемым и вычисленным шаблонами диаграммы излучения. Рассматриваемая в этом подходе архитектура ИНС имеет один скрытый уровень и использует вейвлет-функции в качестве функций активации. Благодаря особым характеристикам вейвлет-функций вейвлет-нейронные сети (В-ИНС) позволяют аппроксимировать шаблоны с резкими переходами.

Выводы

Методы с применением ИНС являются более точными и быстрыми в сравнении с традиционными методами, основанными на линейной алгебре, поскольку ИНС позволяют учитывать изменения свойств системы в реальном времени,

тогда как традиционные методы используют только механизм коэффициентов решетки.

Интеллектуальные антенные решетки, реализующие новый уровень автоматизации в производстве и управлении, могут быть построены на базе моделей МСП, РБФ, ИНСХ и гибридных В-ИНС или ИНС-ГА.

МСП ИНС можно применять для построения систем интеллектуальной поддержки идентификации и локализации неисправностей, автоматизации оценки НИС, идентификации параметров и подавления сигналов источников помех.

ИНС-РБФ эффективны при моделировании препятствий, оценке НИС, цифровом формировании луча и обнаружении дефектных элементов.

Метод ИНСХ можно использовать для эффективного решения задач оптимизации, для реализации автоматизированных систем и комплексов слежения и адаптивного формирования луча.

Гибридные методы (реконструкция изображения источника) ГА и В-ИНС можно использовать, когда значительное влияние имеют эффекты взаимосвязи.

Показано, что ИНС-РБФ намного быстрее, чем МСП ИНС, и подходит для аппроксимации нелинейных отображений, востребованных в задачах автоматизации поиска весов для антенной решетки, идентификации параметров НИС и поиска неисправностей.

Существует обширный спектр нерешенных задач, связанных с проблемами автоматизации производства, управления и интеллектуализации обработки информации антенных решеток, особенно для приложений реального времени.

Отдельного изучения требует вопрос применения ИНС нового поколения, таких, например, как генеративные соревновательные нейронные сети и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ueng Fang-Biau, Chen Jun-Da, Cheng Sheng-Han.** Smart antennas for multiuser DS/CDMA communications in multipath fading channels // IEEE Eighth International Symposium on Spread Spectrum. 2004. P. 400–404.
2. **Alexiou A., Hardt M.** Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges // IEEE Commun Mag. 2004. № 42. P. 90–97.
3. **Rawat A., Yadav R., Shrivastava S.** Neural modelling of 15 element dynamic phased array smart antenna // IEEE International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies. 2009. P. 45–49.
4. **Boukalov A., Hiigman S.** System aspects of smart-antenna technology in cellular wireless communications — an overview // IEEE Trans Microw Theory Tech. 2000. № 6. P. 919–928.
5. **Базулин Е. Г.** Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51–75.
6. **Мазный А. Г.** Диагностика и калибровка многоэлементной фазированной антенной решетки: сб. тез. докл. XLV Международной молодежной научной конференции "Гагаринские чтения-2019". — М.: МАИ, 2019. С. 494.

7. **Легкий Н. М., Унченко И. В.** Формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2 (28). С. 29–38.
8. **Андреев В. Ф.** Активная фазированная антенная решетка. Патент на полезную модель RUS 91653 22.10.2009.
9. **Ares F., Rodriguez J., Villanueva E., Rengajaran S.** Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array pattern // IEEE Trans Antenna Propagation. 1999. № 47. P. 506–510.
10. **Ares F., Rengajaran S., Villanueva E., Moreno S. E.** Application of genetic algorithms and simulated annealing technique in optimizing the aperture distributions of antenna array patterns // Electron Lett. 1996. V. 32, № 3. P. 148–149.
11. **Rodriguez J., Fernandez-Delgado M., Bregains J.** A comparison among several techniques for finding defective elements in antenna array // EUCAP the Second European Conference on Antenna and Propagation, 2007. P. 1–8.
12. **Patnaik A., Choudhury B., Pradhan P., Mishra R., Christodoulou C.** An ANN application for fault finding in antenna arrays // IEEE Trans Antenna Propagation. 2007. № 55. P. 775–777.
13. **Rodriguez J., Ares F., Lepez P., Moreno E.** A simple way of obtaining optimized patterns using the Woodward–Lawson method // IEEE Antenna Propagation Mag. 2006. № 48. P. 100–103.
14. **Haykins S.** Neural networks: A comprehensive foundation. — N.-Y.: IEEE Press/IEEE Computer Society Press, 1994.
15. **Zooghy H., Christodoulou C., Georgiopoulos M.** Neural network-based adaptive beamforming for one- and two-dimensional antenna arrays // IEEE Trans Antenna Propagation. 1998. № 46. P. 1891–1893.
16. **Ayestarán R., Las-Heras F.** Obstacle modelling in array synthesis using neural networks // IEEE Trans Antenna Propagation. 2006. № 54. P. 2420–2424.
17. **Orchard H., Elliott R., Stern G.** Optimising the synthesis of shaped antenna patterns // IEEE Proc Microw Opt Antenna. 1985. № 132. P. 63–68.

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE DESIGN AND OPERATION OF PHASED ARRAY SYSTEMS FOR GIS

A. A. Zhilenkov

St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

S. G. Chernyi

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

This article discusses several applications of neural networks for the synthesis of intelligent antenna arrays and intelligent synthesis, control, testing and management.

Keywords: automation, control, management, synthesis, production, intelligent, neural network.

Bibliography — 17 references.

Received March 5, 2020

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России: Межотр. науч.-техн. журнал / Федеральное государственное унитарное предприятие «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2020. Вып. 2. С. 1—64.

Редактор *О. А. Константинова*

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

Подписано в печать 08.06.2020. Формат 60х84 1/8.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,4. Уч.-изд. л. 7,7.

Тираж 250 экз. Заказ 1951.

Свободная цена.

Адрес редакции: 125424, Москва,

Волоколамское ш., 77. ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

Отпечатано в ООО «РАПИТОГРАФ».

117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 17Б.

Индекс 79379.