

# ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС — научно-техническому прогрессу России



- МАШИНОСТРОЕНИЕ
- ПРИБОРОСТРОЕНИЕ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
- ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ
- СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ  
И ИЗМЕРЕНИЯ



3'2022



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

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



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



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



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



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



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

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

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

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

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



# 3 (155) ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС - научно-техническому прогрессу России

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1984 г.

Москва 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Попов И. П.* Ротатор с фиксированной  
скоростью вращения ..... 3

*Плиплин А. А., Лобов Д. О., Родионов А. В.*  
Глубина контроля комплекса авиационного  
вооружения как составляющая безопасности  
полетов..... 8

*Горячев И. С., Козаченко Л. Н., Зинчен-  
ко Е. Г., Чернобай К. С.* Исследование потери  
управляемости судна для обеспечения без-  
опасного маневрирования..... 11

### ИЗМЕРЕНИЯ. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

*Арсеньев В. Н., Лушпа Е. Ю.* Метод ком-  
плексирования данных при оценивании ха-  
рактеристик сложных систем ..... 15

*Соболев А. С., Зинченко А. А., Ениватов В. В.*  
Тестирование и отладка экспериментального  
образца фильтра преобразователя частоты для  
работы в судовых сетях ограниченной мощ-  
ности..... 22

*Дьячков М. Е.* Применение инструмента  
мониторинга технического состояния изделий  
вооружения и военной техники при планиро-  
вании работ по сервисному обслуживанию в  
местах базирования ..... 28

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

*Щеглов Д. К., Сайбель А. Г.* Формализован-  
ный подход к прогнозированию сроков и  
стоимости разработки военно-технических  
систем ..... 33

*Коновалова А. И.* Современные тенденции  
мирового авиастроения в сфере технологий и  
экологии (*Обзор*) ..... 45

**Главный редактор**

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

**Заместители главного редактора**

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

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

**Ответственный секретарь — К. В. Трыкина,**

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

**Редакционная коллегия:**

**В. И. Борисов**, акад. РАН, 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**, акад. РАН, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ФГУП «ГосНИИАС»; **И. А. Каляев**, акад. 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»; **В. Е. Лукашук**, канд. техн. наук, директор ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; **Ю. И. Маевский**, д-р техн. наук, проф., генеральный конструктор систем и средств РЭБ — зам. генерального директора по инновациям и научной работе ОАО «Концерн Радиоэлектронные технологии»; **Б. В. Обносков**, д-р техн. наук, проф., действительный член РАН, генеральный директор — генеральный конструктор ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»; **В. В. Рыжиков**, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, проф., профессор кафедры «Техническое управление качеством» Пензенского государственного технологического университета (Пенз. ГТУ); **Л. Г. Сидоренко**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАН, генеральный конструктор по специальной тематике ОАО «ЦКБ МТ «Рубин»; **П. А. Созинов**, д-р техн. наук, проф., генеральный конструктор ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей»; **Н. И. Турко**, д-р воен. наук, канд. техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, проф., первый вице-президент Академии военных наук

**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 531.351

DOI: 10.52190/1729-6552\_2022\_3\_3

EDN: TLKJYQ

## РОТАТОР С ФИКСИРОВАННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ

И. П. Попов

Курганский государственный университет, г. Курган, Россия

*Отмечено, что для стабилизации угловой скорости необходимо, чтобы с изменением момента количества движения соответствующим образом изменялся момент инерции. Для решения этой задачи выполнен синтез и анализ устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором. Установлено, что собственная частота вращения стабилизированного ротатора строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами.*

**Ключевые слова:** ротатор, маятник, частота, стабилизация, выбег, энергия, момент импульса, циклотронное движение.

Механические и электромагнитные явления и процессы во многих случаях математически изоморфны [1–4]. Это дает возможность обобщать достижения одной научной специальности на другую. В этом смысле представляет интерес циклотронное движение электрического заряда [5, 6], которое характеризуется фиксированной частотой вращения. Это следует из баланса сил.

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \frac{qB}{m} r = \omega r \Rightarrow \omega = \frac{qB}{m},$$

где  $q$  — величина электрического заряда;

$v$  — тангенциальная скорость заряда;

$B$  — магнитная индукция;

$m$  — масса заряженной частицы;

$r$  — радиус циклотронного движения;

$\omega$  — частота вращения.

Частота действительно не зависит ни от скорости, ни от радиуса.

Ключевым обстоятельством для возможности обобщения циклотронного движения на механику является то, что лагранжиан электрона, движущегося поперек постоянного магнитного поля, вдвое больше его кинетической энергии.

$$L = \frac{mv^2}{2} + e(\mathbf{v}, \mathbf{A}).$$

**Попов Игорь Павлович**, старший преподаватель кафедры "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты".

E-mail: ip.popow@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 7 июля 2022 г.

© Попов И. П., 2022

Векторный потенциал магнитного поля равен

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2}[\mathbf{B}, \mathbf{r}], \text{ при этом } \mathbf{v} = [\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r}].$$

Таким образом,  $L = \frac{mv^2}{2} + \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}$ , где второе слагаемое равно

$$\frac{q^2 B^2 r^2}{2m} = \frac{q^2 B^2}{2m} \frac{m^2 v^2}{q^2 B^2} = \frac{mv^2}{2}.$$

$$\text{Получаем } L = 2 \frac{mv^2}{2}.$$

Цель работы — нахождение механического аналога циклотронного движения и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором.

Тема стабилизации вращений является актуальной [7].

### Синтез стабилизированного ротатора

Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии, что применительно к стабилизированному ротатору следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, необходимо следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запастись оба этих вида энергии, а именно, *груз* (массой  $m$ ) и *пружина* (с коэффициентом упругости  $k$ ).

В соответствии с характером циклотронного движения и, соответственно, ротатора значение имеют *радиус* вращения ( $r$ ) и *циклическая частота* ( $\omega$ ).

Из равенства энергий следует

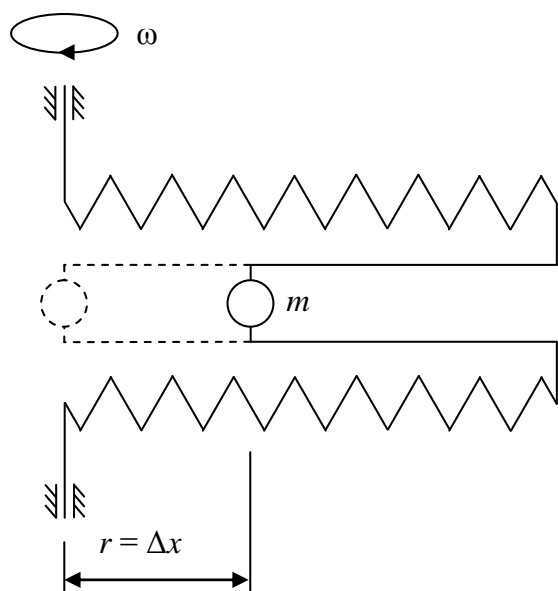
$$\frac{k(\Delta x)^2}{2} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mr^2\omega^2}{2} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{\Delta x}{r},$$

$\Delta x$  — величина абсолютной деформации пружины.

Неизменность циклической частоты обеспечивается очевидным ключевым условием

$$\Delta x = r.$$

Установленные необходимые обстоятельства определяют принципиальную схему стабилизированного ротатора, которая представлена на рисунке.



Стабилизированный ротатор

Собственная частота вращения стабилизированного ротатора

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами.

### Кинематика стабилизированного ротатора

Момент импульса стабилизированного ротатора равен

$$L = J\omega_0 = mr^2\omega_0 = mr^2\sqrt{\frac{k}{m}} = r^2\sqrt{mk},$$

где  $J$  — момент инерции;

$x_\omega = \sqrt{mk}$  — волновой реактанс [8].

$$\text{При } r = \frac{v}{\omega_0}$$

$$L = r^2x_\omega = \frac{v^2}{\omega_0^2}x_\omega = v^2\frac{m}{k}\sqrt{mk} = \frac{m}{\omega_0}v^2.$$

При изменении момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость (частота вращения при этом не меняется и равна собственной).

Положению груза, при котором его центр масс совпадает с осью вращения, соответствует состояние неопределенного равновесия. При вращении груз равновероятно может отклониться в любую из двух сторон и, соответственно, может развиваться как сжатие, так и растяжение пружины.

Состояние неопределенного равновесия можно исключить, обеспечив начальное (статическое) смещение груза  $r_0$  и равную ему начальную деформацию пружины.

### Динамика стабилизированного ротатора

При раскручивании преднапряженного ротатора до частоты  $\omega_0$  центробежная сила  $m\omega^2r$  меньше силы начальной деформации пружины  $kr_0$ , поэтому радиус  $r_0$  не изменяется. Это учтено в линейной динамике [0,  $\omega_0$ ].

$$r = r_0, \quad \omega = \frac{M}{mr_0^2}t.$$

За время  $t_0$  при постоянном вращающем моменте  $M$  ротатор достигнет частоты вращения  $\omega_0$ .

$$t_0 = \frac{\omega_0 mr_0^2}{M} = \frac{\sqrt{mk}r_0^2}{M} = \frac{L_0}{M}.$$

При дальнейшем нагружении стабилизированного ротора вращающим моментом его динамика (нелинейный участок) описывается системой двух дифференциальных уравнений — вращательного и поступательного (радиального)

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J} = \frac{M}{mr^2} \\ m \frac{d^2r}{dt^2} = \frac{mv^2}{r} - kr = \frac{m\omega^2 r^2}{r} - kr = (m\omega^2 - k)r. \end{cases}$$

Трение здесь не учитывается.

Начальные условия:

$$\omega|_{t=t_0} = \omega_0, \quad r|_{t=t_0} = r_0, \quad \frac{dr}{dt}\bigg|_{t=t_0} = 0.$$

Из системы уравнений и начальных условий следует:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt}\bigg|_{t=t_0} &= \frac{M}{mr_0^2}, \\ \frac{d^2\omega}{dt^2} &= -2\frac{M}{mr^3} \frac{dr}{dt}, \quad \frac{d^2\omega}{dt^2}\bigg|_{t=t_0} = 0, \\ \frac{d^2r}{dt^2} &= (\omega^2 - \omega_0^2)r, \quad \frac{d^2r}{dt^2}\bigg|_{t=t_0} = 0, \\ \frac{d^3r}{dt^3} &= 2\omega \frac{d\omega}{dt} r + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{dr}{dt}, \\ \frac{d^3r}{dt^3}\bigg|_{t=t_0} &= 2\omega_0 \frac{M}{mr_0^2} r_0 = 2\omega_0 \frac{M}{mr_0}, \\ \frac{d^3\omega}{dt^3} &= 6\frac{M}{mr^4} \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 - 2\frac{M}{mr^3} \frac{d^2r}{dt^2}, \quad \frac{d^3\omega}{dt^3}\bigg|_{t=t_0} = 0, \\ \frac{d^4\omega}{dt^4} &= -24\frac{M}{mr^5} \left(\frac{dr}{dt}\right)^3 + 6\frac{M}{mr^4} 2\frac{dr}{dt} \frac{d^2r}{dt^2} + \\ &+ 6\frac{M}{mr^4} \frac{dr}{dt} \frac{d^2r}{dt^2} - 2\frac{M}{mr^3} \frac{d^3r}{dt^3}, \\ \frac{d^4\omega}{dt^4}\bigg|_{t=t_0} &= -2\frac{M}{mr_0^3} 2\omega_0 \frac{M}{mr_0} = -4\omega_0 \frac{M^2}{m^2 r_0^4}, \\ \frac{d^4r}{dt^4} &= 2\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 r + 2\omega \frac{d^2\omega}{dt^2} r + 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} + \\ &+ 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{d^2r}{dt^2}, \end{aligned}$$

$$\frac{d^4r}{dt^4}\bigg|_{t=t_0} = 2\left(\frac{M}{mr_0^2}\right)^2 r = \frac{2M^2}{m^2 r_0^3}.$$

Таким образом, частота вращения стабилизированного ротора и радиус представимы в виде:

$$\begin{aligned} \omega &\approx \frac{1}{0!} \omega(0) t^0 + \frac{1}{1!} \frac{d\omega}{dt}(0) t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2\omega}{dt^2}(0) t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3\omega}{dt^3}(0) t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4\omega}{dt^4}(0) t^4 + \dots = \\ &= \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2} t + \frac{1}{2!} 0 t^2 + \frac{1}{3!} 0 t^3 - \\ &- \frac{1}{4!} 4\omega_0 \frac{M^2}{m^2 r_0^4} t^4 + \dots = \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2} t - \frac{\omega_0 M^2}{6m^2 r_0^4} t^4 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r &\approx \frac{1}{0!} r(0) t^0 + \frac{1}{1!} \frac{dr}{dt}(0) t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2r}{dt^2}(0) t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3r}{dt^3}(0) t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4r}{dt^4}(0) t^4 + \dots = \\ &= r_0 + 0t + \frac{1}{2!} 0 t^2 + \frac{1}{3!} 2\omega_0 \frac{M}{mr_0} t^3 + \\ &+ \frac{1}{4!} \frac{2M^2}{m^2 r_0^3} t^4 + \dots = r_0 + \frac{\omega_0 M}{3mr_0} t^3 + \frac{M^2}{12m^2 r_0^3} t^4 + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Вопрос о сходимости рядов здесь не рассматривается.

Смысл последних двух уравнений состоит в иллюстрации нелинейности динамики стабилизированного ротора при нагружении его постоянным вращающим (тормозящим) моментом.

Подобно тому как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, частота вращения стабилизированного ротора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения.

Из (2) следует, что чем меньше момент  $M$  и больше  $m$  и  $r_0$ , тем меньше отклонение частоты вращения  $\omega$  от собственной  $\omega_0$ .

### Второе замечательное свойство стабилизированного ротора

Первым свойством стабилизированного ротора является фиксированная собственная частота вращения (1) и ее совпадение с собственной частотой колебаний маятника.

При *вынужденном* вращении стабилизированного ротатора с постоянной частотой

$$\omega = a\omega_0$$

( $a$  — безразмерный коэффициент) его радиальная динамика определяется уравнением

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \left( \omega^2 - \frac{k}{m} \right) r = \left( a^2 \omega_0^2 - \omega_0^2 \right) r = - (1 - a^2) \omega_0^2 r.$$

В зависимости от значения  $a$  возможны три варианта.

1. При  $a < 1$  имеет место дифференциальное уравнение свободных гармонических незатухающих колебаний с собственной частотой

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{1 - a^2}.$$

Таким образом, стабилизированный ротатор доставляет возможность управлять собственной частотой колебаний радиального осциллятора.

2. При  $a = 1$  имеет место  $\frac{d^2 r}{dt^2} = 0$ ,

$$\frac{dr}{dt} = V = \text{const}, \quad r = r_{01} + Vt.$$

Колебания не происходят.

3. При  $a > 1$  имеет место  $\frac{d^2 r}{dt^2} = (a^2 - 1) \omega_0^2 r$ ,

$$r = r_{01} e^{\left( \omega_0 \sqrt{a^2 - 1} \right) t}.$$

Колебания не происходят.

Затухание колебаний в стабилизированном ротаторе принципиально не отличается от затухания в обычном маятнике.

### Выбег ротатора в стабилизированном режиме

Минимальная полная энергия стабилизированного ротатора в стабилизированном режиме соответствует статическому смещению груза  $r_0$

$$W_0 = K_0 + U_0 = 2K_0 = 2U_0 = kr_0^2.$$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И. П. Инерционная, диссипативная и другие виды механической мощности // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2022. № 1(153). С. 27—31. DOI: 10.52190/1729-6552\_2022\_1\_27.
2. Попов И. П. Условно-ортогональные механические мощности // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 4(144). С. 15—17.

Максимальная полная энергия теоретически не ограничена, а практически определяется конструктивно установленным максимальным радиусом  $r_m$ .

$$W_m = kr_m^2.$$

Пусть средняя за выбег мощность диссипативных потерь равна  $P$ .

Тогда время выбега составит

$$\tau = \frac{W_m - W_0}{P} = k \frac{r_m^2 - r_0^2}{P}.$$

Очевидно, что чем меньше  $P$ , тем меньше отклонение частоты вращения  $\omega$  от собственной  $\omega_0$ .

### Заключение

Заявленная цель работы достигнута. Механический аналог циклотронного движения определен. Им является стабилизированный ротатор, обладающий фиксированной частотой вращения, не зависящей от момента импульса и момента инерции.

Это означает, что при нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротатора не может быть произвольной и принимает единственное значение.

Другими особенностями стабилизированного ротатора являются идентичность формулы частоты вращения формуле частоты пружинного маятника, равенство кинетической и потенциальной энергий и вытекающее из этого равенство радиуса вращения груза величине деформации пружины.

Стабилизированный ротатор может использоваться для управления собственной частотой колебаний радиального осциллятора, хотя в этом качестве он может иметь сильную конкуренцию со стороны мехатронных систем [9, 10].

Напротив, в качестве стабилизатора вращений его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.



3. **Попов И. П.** Электромагнитный маховик для ориентирования орбитальных объектов // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 2(142). С. 15—17.
4. **Попов И. П.** Математическая модель искусственной электрической емкости для снижения пиковой нагрузки маневрового тепловоза // Прикладная математика и вопросы управления. 2019. № 3. С. 57—64. DOI: 10.15593/2499-9873/2019.3.03.
5. **Павлов В. Д.** Теоремы об излучении заряда // Инженерная физика. 2021. № 6. С. 37—40. DOI: 10.25791/infizik.6.2021.1213.
6. **Павлов В. Д.** Энергетика излучения электрического заряда и ее следствия // Известия Уфимского научного центра РАН. 2021. № 4. С. 5—8. DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-4-5-8.
7. **Попов И. П.** Годографы суперпозиций вращений // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2020. № 3(147). С. 41—45.
8. **Попов И. П.** Резонансы и антирезонансы в механических системах // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2021. № 2(150). С. 14—22.
9. **Попов И. П.** Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1(19). С. 18—20.
10. **Попов И. П.** Спонтанные упруго-емкостные колебания в системах автоматики // Вестник Морского государственного университета им. адмирала Г. И. Невельского. Серия: Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. 2017. Вып. 78. С. 93—97.

## **FIXED SPEED ROTATOR**

*I. P. Popov*

Kurgan State University, Kurgan, Russia

*It is noted that in order to stabilize the angular velocity, it is necessary that with a change in the angular momentum, the moment of inertia should change accordingly. To solve this problem, a synthesis and analysis of a device, which is appropriate to call a stabilized rotator, was carried out. It has been established that the natural frequency of rotation of the stabilized rotator is strictly fixed (it does not depend on either the moment of inertia or the moment of momentum) and remarkably coincides with the natural frequency of the pendulum with identical parameters.*

*Keywords:* rotator, pendulum, frequency, stabilization, run-out, energy, angular momentum, cyclotron motion.

Bibliography — 10 references.

*Received July 7, 2022*

УДК 623.1/.7; 62-5

DOI: 10.52190/1729-6552\_2022\_3\_8

EDN: TRQOMN

## ГЛУБИНА КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСА АВИАЦИОННОГО ВООРУЖЕНИЯ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ

А. А. Плиплин, канд. техн. наук; Д. О. Лобов

Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

А. В. Родионов, канд. техн. наук

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

*В статье рассматриваются вопросы контроля комплекса авиационного вооружения. Рассмотрена система контроля управляемых авиационных средств поражения, универсальность системы, однотипность параметров, характеризующих техническое состояние управляемых авиационных средств поражения.*

*Ключевые слова:* комплекс авиационного вооружения, техническое состояние, контроль.

Система контроля комплекса авиационного вооружения (КАВ) характеризуется количественными показателями его свойств, т. е. показателями качества. Эти показатели используют при формировании требований к системе контроля, при сравнении одних систем с другими системами того же назначения [1]. Основными показателями качества системы контроля являются: эффективность, достоверность, точность, стоимость, объем и глубина контроля.

Эффективность контроля является мерой целесообразности применения контроля и зависит от достоверности, производительности, ресурса, а также стоимости затрат на создание средств контроля и его выполнение.

Достоверность контроля — это мера определенности результатов контроля, она зависит от точности и объема контролируемых параметров.

Точность контроля — это характеристика средств измерения параметров и метода их оценивания.

Стоимость контроля оценивается в денежных единицах и содержит стоимость системы контроля и стоимость затрат на его выполнение.

---

Плиплин Андрей Александрович, доцент.

E-mail: samolet31@rambler.ru

Лобов Дмитрий Олегович, курсант.

E-mail: samolet31@rambler.ru

Родионов Алексей Васильевич, доцент, профессор кафедры.

E-mail: samolet31@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 2 августа 2022 г.*

© Плиплин А. А., Лобов Д. О., Родионов А. В., 2022

Объем контроля — это количество и перечень параметров, подлежащих контролю.

Глубина контроля определяется положением контролируемого элемента в иерархической системе построения изделия.

Контроль устройств КАВ осуществляется посредством встроенных в каждое устройство блоков, обеспечивающих контроль устройства в двух режимах — режимы постоянного (контроль функционирования) и кратковременного (тестовый контроль) контроля. Отображение информации о техническом состоянии бортовых устройств КАВ проводится на специальных индикаторах.

Особое место в системе контроля имеет система предупреждения экипажа и регистрации технического состояния устройств.

Система предупреждения экипажа и регистрации технического состояния устройств предназначена для информации экипажа об отказах оборудования и регистрации отказов для послеполетного анализа. Индикация отказов может осуществляться посредством светового табло в виде символов, загораний сигнальных ламп (например, мерцание бленкера наличия управляемой ракеты при ее несходе). При формировании сигналов учитывается их приоритетность, определяемая значимостью отказа для безопасности полета.

Более подробно остановимся на системе контроля управляемых авиационных средств поражения (УАСП).

Многообразие изделий определяет требование универсальности системы контроля.

Универсальность системы обеспечивается:

- выделением во всех контролируемых изделиях однотипных групп параметров;
- разделением системы контроля на две подсистемы — универсальную и специальную.

Однотипные параметры, характеризующие техническое состояние УАСП, входят в состав следующих элементов конструкции изделия:

- координатора;
- автопилота;
- системы создания управляющей силы;
- системы подрыва;
- системы энергоснабжения;
- электрической сети.

Анализ надежности КАВ и безопасности полетов является важнейшей и постоянной обязанностью всех должностных лиц инженерно-авиационной службы [2].

Основным из инструментов, с помощью которого ведется разработка мероприятий для обеспечения надежности КАВ в условиях эксплуатации, является статистика. Первичным источником статистики служит информация отказов. Основными целями анализа являются классификация отказов, определение причин, их вызывающих, раскрытие механизмов отказов, разработка организованных и технических мероприятий по предотвращению отказов.

Классификация отказов на этапе эксплуатации КАВ имеет своей целью определение факторов, имеющих доминирующее значение в формировании причин отказов. Такими факторами могут быть конструктивные недоработки, дефекты материалов, нарушение технологического режима и установленных процедур выполнения ремонтно-профилактических работ.

Иногда, в отдельных случаях, отказы, происшедшие по вине инженерно-технического и летного состава, стараются не оформлять документально, ограничиваясь лишь проведением разбора. Отказы, происходящие по причине человеческого фактора, при обработке статистики дают возможность более глубоко проанализировать конструкцию систем и элементов КАВ и методы их обслуживания. На основе этого анализа возможно усовершенствование конструкции, схем, узлов, агрегатов, что позволит в дальнейшем предотвратить подобные отказы.

Необходимо отметить, что при оценке технического состояния УАСП не осуществляется контроль технического состояния твердотопливного двигателя УАСП, что является огромным недостатком. Известно несколько случаев нештатного срабатывания двигательной установки ракет. Так 25 марта 2020 г. произошла катастрофа самолета Су-27П. Причиной авиационного происшествия явилось разрушение (подрыв)

твердого топлива двигателя РДТТ-295 ракеты Р-73 после ее пуска, приведшее к повреждению самолета и последующему нарушению его управляемости.

Разрушение (подрыв) твердого топлива двигателя ракеты явилось следствием изменения его физико-механических характеристик.

Таким образом, возникает необходимость неразрушающего контроля двигателей авиационных ракет.

Из известных девяти видов неразрушающего контроля — оптического, проникающими веществами, магнитного, вихревого, акустического, радиационного, электрического, теплового и радиоволнового — при войсковом ремонте применяют первые шесть [3].

Каждый вид неразрушающего контроля в зависимости от характера взаимодействия физического поля или вещества с контролируемой деталью, первичной информации о наличии или отсутствии дефекта, способа получения этой информации подразделяются на методы неразрушающего контроля. Наибольшее распространение при ремонте получили следующие методы неразрушающего контроля: визуально-оптический, капиллярный цветной, магнитопорошковый, вихрековый, ультразвуковой, импедансный и рентгеновский.

При контроле технического состояния двигателя авиационных ракет наиболее предпочтительным выглядит рентгеновский метод контроля, который основан на регистрации и анализе проникающего рентгеновского излучения после взаимодействия с контролируемым объектом.

Высокочастотные электромагнитные волны (рентгеновские лучи), обладая большой энергией, имеют высокую проникающую способность и обладают также ионизирующим, световозбуждающим и фотографическим действиями, что в свою очередь дает возможность контроля технического состояния (внутренних дефектов) двигателей авиационных ракет.

Отказы КАВ, которые угрожают безопасности полета, являются предпосылками к летным происшествиям и требуют немедленных мероприятий по их устранению и предупреждению.

Известны случаи самопроизвольного сброса авиационных бомб при взлете (посадке) и в полете из-за неполного закрытия замка балочного держателя и неисправности механизма блокировки сигнализации.

К сожалению, в настоящее время осуществить контроль неполного закрытия замка не всегда возможно, также невозможно определить исправность механизма блокировки сигнализации [4], что в свою очередь свидетельствует о необходимости разработки дополнительной сиг-

нализации закрытия замка и разработки контрольно-проверочной аппаратуры проверки технического состояния механизма блокировки сигнализации.

Таким образом, на безопасность полетов не последнюю роль играет объем и глубина кон-

троля технического состояния КАВ. Для исключения (уменьшения вероятности) летных происшествий необходимо совершенствовать как технологию контроля КАВ, так и контрольно-проверочную аппаратуру агрегатов авиационного вооружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Закутаев В. Д.** Робототехнические системы подготовки и контроля комплексов авиационного вооружения: учебник. — М.: ВУНЦ ВВС "ВВА", 2011. — 384 с.
2. **Теслев А. Л.** Войсковой ремонт: учебник. — М.: Военное издательство, 1994. — 448 с.
3. **Подкопаев А. В., Кондрашов Н. Г., Плиплин А. А.** Надежность и техническая диагностика: учебное пособие. — Воронеж: ВУНЦ ВВС "ВВА", 2016. — 288 с.
4. Снаряжение самолета Су-25 неуправляемыми средствами поражения: методические рекомендации. Выпуск № 7151.

## **THE DEPTH OF CONTROL OF THE AVIATION WEAPONS COMPLEX AS A COMPONENT OF FLIGHT SAFETY**

*A. A. Pliplin, D. O. Lobov*

Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education Military Educational Research Centre of Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin", Voronezh, Russia

*A. V. Rodionov*

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

*The article deals with the issues of control of the complex of aviation weapons. The control system of controlled aviation weapons, the universality of the system, the uniformity of parameters characterizing the technical condition of controlled aviation weapons are considered.*

*Keywords:* complex of aviation weapons, technical condition, control.

Bibliography — 4 references.

*Received August 2, 2022*

УДК 656.61.052

DOI: 10.52190/1729-6552\_2022\_3\_11

EDN: TZVMSS

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ УПРАВЛЯЕМОСТИ СУДНА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ

И. С. Горячев, Л. Н. Козаченко, Е. Г. Зинченко, К. С. Чернобай

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,  
г. Керчь, Россия

*Проведено исследование, которое заключается в идентификации потери управляемости судна для обеспечения безопасного маневрирования. Представлена математическая модель и концепция обеспечения процесса безопасного маневрирования данными о свойствах при потере управляемости, которая может быть использована в автоматизированных системах управления движением судна, как коэффициент снижения риска и повышения живучести судна.*

**Ключевые слова:** исследование потери управляемости судна, обеспечения безопасного маневрирования, числа Фруда, формула Л. Прандтля.

### Актуальность и цель исследования

Для обеспечения безопасности судно должно в течение всего времени маневрирования сохранять управляемость, используя для этого только рулевое устройство. При снижении скорости в условиях штормовой погоды, ограниченной видимости и выполнении морских операций по постановке на якорь и швартовке в открытом море и портовых водах возникает угроза потери управляемости. Для обеспечения сохранения управляемости судоводитель должен четко прогнозировать время потери ее наступления. Однако формализованных моделей для прогноза нет, что существенно ухудшает условия работы оператора [1–3].

Цель исследования — установление времени потери управляемости судна для обеспечения безопасного маневрирования.

**Горячев Иван Сергеевич**, старший преподаватель.

E-mail: esiap@mail.ru

**Козаченко Любовь Николаевна**, старший преподаватель.

E-mail: Sudovodkgmtu@mail.ru

**Зинченко Елена Геннадьевна**, аспирант.

E-mail: eltel85@bk.ru

**Чернобай Кирилл Сергеевич**, аспирант.

E-mail: chernobaikiril@ya.ru

*Статья поступила в редакцию 6 сентября 2022 г.*

© Горячев И. С., Козаченко Л. Н., Зинченко Е. Г., Чернобай К. С., 2022

### Результаты исследований

Рассмотрим движение судна при наличии ветра. Под действием сил давления воздуха на надводную его часть и действием сил волнения на его подводную часть путь судна претерпевает значительные изменения. Установившемуся значению ветра сопутствует развитое волнение. При рассмотрении его влияния на судно отдельно силы от ветра и волнения не разделяют.

При движении в тихую погоду для удержания судна на курсе рулевой манипулирует вокруг нулевого положения, отклоняя руль на угол около  $\delta_{\text{ТВ}} = 3\text{--}5^\circ$ . Для компенсации суммарного момента от действия ветра и волнения на корпусе, возникающего от дрейфа судна, руль приходится перекладывать на постоянный угол  $\delta_{\text{К}}$ . Для удержания судна на курсе при рыскания приходится манипулировать рулем, перекладывая на угол  $\delta_{\text{В}}$ , вокруг положения  $\delta_{\text{К}}$ . Угол перекладки руля при движении в условиях ветра составляет  $\delta_{\text{В}} \approx 5\text{--}10^\circ$ . Удержание судна на курсе можно будет производить до тех пор, пока момент силы на руле будет компенсировать суммарный момент от действия сил ветра и волнения с учетом необходимого запаса для выравнивания рыскания. Момент наступления потери управляемости будет зависеть от загрузки судна, курсового угла кажущегося ветра  $q_{\text{В}}$  и отношения скорости ветра к скорости движения судна  $W/V_{\text{Д}}$ . По мере увеличения отношения  $W/V_{\text{Д}}$  и угла  $\alpha$  воз-



растают значения  $\delta_k$  и  $\delta_b$ . В момент, когда  $\delta_k + \delta_b < \delta_{\max}$ , наступит потеря управляемости. Для морских судов максимальный угол равен  $35^\circ$ , для речных и рыбопромысловых достигает  $90^\circ$ .

Главная задача изучения этого состояния судна состоит в том, чтобы выяснить условия, при которых она наступает, и обосновать меры по ее исключению [3–6]. Система уравнений установившегося движения судна при наличии ветра будет иметь вид:

$$R_y - R_{ay} + R_{py} = 0, \quad (1)$$

$$M_r - M_a + M_p = 0. \quad (2)$$

Для решения уравнений (1) и (2) необходимо определить безразмерные коэффициенты аэро- и гидродинамических сил и силы на руле, а также плеч указанных сил. Расчет количественных соотношений для сил и моментов можно выполнить только приближенно. По этой причине количественное описание процесса потери управляемости будет носить аналогичный характер.

Уравнения для моментов (2) в развернутом виде можно записать так:

$$\begin{aligned} & (C_y \rho S_{\Pi} V_{\Pi}^2) \bar{\ell}_r - (C_{ay} \rho_b S_{\Pi} W^2) \bar{\ell}_a + \\ & + (C_{py} \rho S_p V_p^2) \bar{\ell}_p = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Значение  $\bar{\ell}_r$  можно определить по приближенной формуле  $\bar{\ell}_a$ . Расчет коэффициента поперечной гидродинамической силы на руле можно произвести по формуле Л. Прандтля:

$$C_{py} = \frac{2\pi}{1 + (2/\lambda_p)} \delta^\circ, \quad (4)$$

где  $\lambda_p$  — относительное удлинение руля;

$\delta^\circ$  — угол перекладки руля в градусах.

Для руля, расположенного за винтом, скорость набегающего потока можно приближенно принять равной:

$$V_p = (1,3 \div 1,4) V_{\Pi}. \quad (5)$$

С учетом приведенных зависимостей это можно привести к виду:

$$\begin{aligned} \delta_k = & \frac{1 + (2/\lambda_p)}{1,35^2 S_{p0} 0,5\pi} \left[ \left( 0,25 + \frac{\ell_{\Pi\Pi}}{L} - \frac{q_w}{360} \right) \times \right. \\ & \times 1,05 \sin q_w \rho_b S_{\Pi} \frac{W^2}{V_{\Pi}^2} + \left( 0,5 + \frac{\ell_{\Pi\text{бс}}}{L} - \frac{\alpha}{180} \right) \times \\ & \left. \times \frac{0,23 \sin \alpha + 1,09 \sin^2 \alpha}{(2,1 \delta_{\text{оп}} - 7 T/L)^2} \rho S_{\Pi} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где отстояние центра бокового сопротивления (ЦБС) от мидель-шпангоута можно приближенно рассчитать по формуле [3–6]:

$$\ell_{\Pi\text{бс}} = \frac{1 + 2 T_{\Pi} / T_K}{3 (1 + T_{\Pi} / T_K)} - 0,5. \quad (7)$$

Известно, что наиболее опасным с точки зрения потери управляемости, является попутный ветер при  $q_w = 120^\circ$ , считая  $\delta_{\max} = 35^\circ$ ,  $\delta_b = 10^\circ$ .

Расчет был произведен для случая, когда относительная скорость кажущегося ветра  $W/V_{\Pi}$  равна 1, 2, 3, 4. Результаты расчета приведены в таблице.

При таком подходе необходимо помнить, что потеря управляемости произойдет при  $q_w = 120^\circ$ , при другом значении курсового угла она может и не произойти, однако такая опасность при маневрировании существует. Чтобы избежать потери управляемости, необходимо увеличить скорость движения судна, либо изменить курсовой угол по отношению к ветру. При маневрировании на пониженных скоростях очень часто судно постоянно теряет управляемость, и в таких случаях приходится использовать буксиры [5–7].

Формализованные модели расчета потери управляемости используются в составе системы управления маневрированием для выбора безопасной скорости, которая обеспечивает управляемость судна при выполнении морских операций. Будем различать две логические структуры алгоритма выбора безопасного режима движения. В первой назначается верхний предел режима движения, при котором главный двигатель можно перевести на упор заднего хода для остановки движения. Вторая структура заключается в назначении нижнего предела скорости, при которой судно сохраняет управляемость и обеспечивается заданное состояние системы управления маневрированием. Для изучения системы

управления работой судна и рассмотрения подходов к содержательному моделированию процессов организации его использования произведем ее декомпозицию на составляющие подсистемы. Структурную схему процесса управления судном предлагается представлять так, как это приведено на рис. 1.

Эмпирические кривые регрессии зависимости потери управляемости от энерговооруженности при значении  $Fr = 0,05$  приведены на рис. 2, с учетом коэффициента инертности  $K_{\text{эн}}$ . Для выполнения расчетов использовалась программа Modelship.

Данные для расчета потери управляемости т/х "Микола Бажан" в балласте

Параметры					Длина между перпендикулярами $L = 199,8$			
					в грузе		в балласте	
Средняя осадка $T_{\text{ср}}$ , м					12,3		8,1	
Площадь проекции надводной части на ДП					2300		3100	
Площадь проекции подводной части на ДП					2084		1280	
Коэффициент общей полноты					0,800		0,786	
Отстояние центра парусности $l_{\text{шп}}$					-0,066		0	
Отстояние центра бокового сопротивления $l_{\text{бс}}$					0		-0,04	
$W/V_{\text{л}}$	1		2		3		4	
$\alpha$	$\delta_{\text{к}}$		$\delta_{\text{к}}$		$\delta_{\text{к}}$		$\delta_{\text{к}}$	
	$qw = 60^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$120^\circ$
1	2,1	1,4	3,1	0,4	4,7	—	7,1	—
2	4,0	3,4	5,0	2,4	6,7	0,7	9,0	—
3	6,2	5,5	7,2	4,5	8,9	2,9	11,2	0,5
4	8,6	7,9	12,1	6,9	11,2	5,2	13,6	2,9
5	11,1	10,5	14,9	9,5	13,8	7,8	16,1	5,5
6	13,9	13,2	17,8	12,2	16,6	10,6	18,9	8,2
7	16,8	16,1	20,9	15,2	19,5	13,5	21,8	11,2
8	19,9	19,2	24,1	18,2	22,6	16,6	24,9	14,2
9	23,1	22,5	27,5	21,5	25,8	19,8	—	17,5
10	26,5	25,8	—	24,8	—	23,2	—	20,8

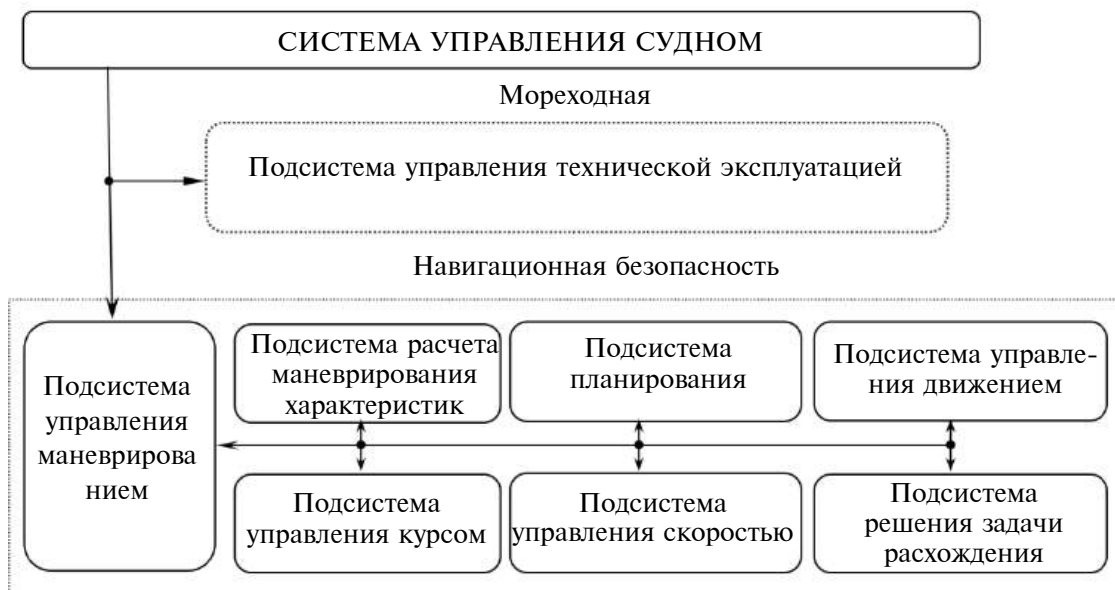


Рис. 1. Система управления судном

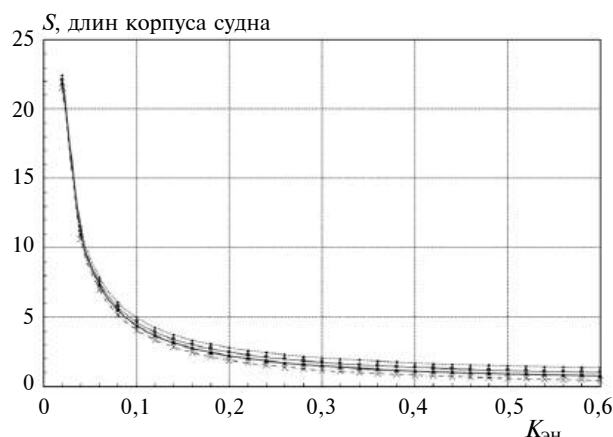


Рис. 2. Эмпирические кривые регрессии при расчете потери управляемости  $m/x$  "Микола Бажан" для числа Фруда 0,5

### Выводы

Рассмотренная концепция обеспечения процесса безопасного маневрирования данными о маневренных свойствах при потере управляемо-

сти может быть использована в автоматизированных системах управления движением судна, при научных исследованиях и в учебном процессе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ аварийности морских судов. Одесса // Судостроение. 2000. № 9. С. 12—19.
2. Юдович А. Б. Предупреждение навигационных аварий морских судов. — М.: Транспорт, 1998. — 235 с.
3. Черный С. Г., Соболев А. С., Зинченко А. А., Зинченко Е. Г., Чернобай К. С. Эксплуатации судового оборудования на платформе интеллектуальных систем для повышения надежности работы систем автоматики // Морской вестник. 2022. № 1(81). С. 68—71.
4. Горячев И. С., Черный С. Г. АСУТП лоцманской проводки морских судов // Автоматизация в промышленности. 2022. № 6. С. 54—56.
5. Черный С. Г., Жуков В. А., Соболев А. С., Зинченко А. А., Зинченко Е. Г. Обзор эффективных методов идентификации параметров электрической сети судов для повышения эксплуатационных качеств // Морская радиоэлектроника. 2022. № 1(79). С. 42—47.
6. Голиков В. А. Повышение эффективности и оптимизация режимов работы систем судового микроклимата: Дисс. ... докт. техн. наук: 05.08.05. — Одесса, 2000. — 408 с.
7. Мальцев А. С., Романов Г. С., Гончаров Е. И., Вильский Г. Б. Подготовка лоцманов к управлению маневрами судна. Сб. науч. трудов "Судовождение". — Одесса: ОНМА, Феникс, 2004. Вып. 8. С. 63—76.

## INVESTIGATION OF LOSS CONTROL OF THE VESSEL TO ENSURE SAFE MANEUVERING

I. S. Goryachev, L. N. Kozachenko, E. G. Zinchenko, K. S. Chernobay  
Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

*A study has been conducted, which consists in identifying the loss of controllability of the vessel to ensure safe maneuvering. The mathematical model and the concept of providing the process of safe maneuvering with data on properties in case of loss of controllability, which can be used in automated vessel motion control systems, as a risk reduction coefficient and increase the survivability of the vessel, are presented.*

**Keywords:** study of loss of control of the vessel, ensure safe manoeuvring, the Froude number, the formula L. Prandtl.

Bibliography — 7 references.

Received September 6, 2022

УДК 629.191

DOI: 10.52190/1729-6552\_2022\_3\_15

EDN: UDFSGA

## МЕТОД КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В. Н. Арсеньев, д-р техн. наук

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

Е. Ю. Лушпа, канд. техн. наук

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

*Предложен метод оценивания характеристик сложной системы по данным, полученным на различных этапах ее исследований. Комплексирование всех данных осуществляется с учетом их близости к информации, полученной по результатам испытаний опытных образцов системы. Метод требует минимальной априорной информации и в отличие от большинства известных методов не привязан к конкретному виду распределения априорной оценки характеристик системы. Подход остается неизменным при любых априорных распределениях. В силу простоты и универсальности он может быть широко использован при исследовании свойств сложных систем в условиях ограничений на проведение испытаний опытных образцов.*

*Ключевые слова:* сложная система, характеристики, комплексирование данных, универсальный подход.

Для решения различных задач, связанных с развитием техники, экономики, промышленности, сферы обслуживания, проведением научных исследований, укреплением обороноспособности страны широко используют сложные системы (системы массового обслуживания, автоматизированные системы управления, производственные комплексы, летательные аппараты и др.)

Сложная система (СС), как и любой исследуемый объект, обладает совокупностью свойств (надежностью, точностью, оперативностью и рядом других), определяющих ее качество. Количественной мерой того или иного свойства или совокупности свойств системы является показатель или характеристика качества. Показатели могут быть функциональными или экономическими. В задании на разработку СС формируются требования, в том числе в виде условий (критериев), которым должны удовлетворять эти показатели. Система может быть принята в эксплуатацию только в случае удовлетворения всех предъявляемых к ней требований.

Поэтому одной из основных задач проектирования, разработки и испытаний как отдельных подсистем системы, так и сложной системы в целом является получение объективных оценок величин (показателей), характеризующих ее качество. Для решения этой задачи используют информацию, полученную на различных этапах создания СС.

Накоплен большой опыт исследования характеристик СС, используемых в космической отрасли и оборонном комплексе страны. В частности, новые образцы вооружения и военной техники, как правило, являются сложными техническими системами. Достоверные данные о реальных значениях характеристик такой системы получают по результатам натурных испытаний ее опытных образцов [1]. При этом число испытаний должно быть достаточно большим [2]. На практике реализовать опытную отработку системы в полном объеме не удается из-за больших материальных и финансовых затрат [3]. Поэтому для оценивания характеристик СС широко используются другие методы и, в частности, метод имитационного моделирования [4]. Если используемые имитаторы и имитационные модели адекватно описывают составные части и условия функционирования СС, то данные, полученные в процессе имитационного моделирования, могут быть близки к опытным данным. В то же время при наличии результатов натурных испытаний и имитационного моделирова-

---

Арсеньев Владимир Николаевич, профессор.

E-mail: vladar56@mail.ru

Лушпа Евгений Юрьевич, доцент, профессор кафедры РВСН ВУЦ.

E-mail: euglushpa@list.ru

Статья поступила в редакцию 11 июля 2022 г.

© Арсеньев В. Н., Лушпа Е. Ю., 2022

ния совместное их применение позволяет не только уточнить используемые при моделировании математические модели, но и повысить достоверность оценок характеристик СС. Для решения последней задачи используют опытно-теоретические методы, позволяющие комплексировать априорную и опытную информацию и получить комбинированные оценки соответствующих характеристик системы. Достаточно подробно они представлены в работах [1, 5, 6]. Каждый из существующих методов имеет свои достоинства и недостатки. Методы, основанные на теореме гипотез, требуют наиболее полной априорной информации в виде законов распределения априорных оценок характеристик системы и, фактически, не учитывают возможную неоднородность результатов априорных исследований и натурных испытаний [7]. Применение линейных и нелинейных моделей, используемых для комплексирования опытных данных, полученных по результатам испытаний опытных образцов, и априорных данных о характеристиках СС, ограничивается, главным образом, сложностью определения параметров этих моделей [1, 3, 8–10]. Данное ограничение удалось обойти в методе приоритета опытной информации (ПОИ) [11, 12]. Однако в основе метода ПОИ лежит допущение об одинаковом виде распределений априорной и опытной оценок исследуемых характеристик СС.

Отмеченных недостатков, по мнению авторов, лишен предлагаемый ими метод получения комбинированных оценок характеристик сложных систем, учитывающих результаты априорных исследований и натурных испытаний опытных образцов.

### Постановка задачи

Рассмотрим некоторую случайную физическую величину (в общем случае векторную, состоящую из  $n$  элементов)  $\hat{X}$ , характеризующую качество функционирования СС. Для отличия случайных величин от детерминированных используется значок " $\wedge$ ". В дальнейшем будем полагать, что  $\hat{X}$  — вектор-столбец.

Известен вид функции плотности распределения вероятностей величины  $\hat{X}$

$$\varphi_{\hat{X}}(\hat{X}; \mu), \quad (1)$$

где  $\mu$  — в общем случае многомерная величина (вектор или матрица), состоящая из параметров

распределения  $\hat{X}$ , которые также могут быть многомерными величинами (векторами или матрицами). Поскольку параметры распределения (1) либо сами являются характеристиками СС, либо связаны с исследуемыми характеристиками однозначной зависимостью, то в дальнейшем  $\mu$  будем называть характеристиками исследуемого свойства системы. Например, если исследуется надежность системы, то время безотказной работы при экспоненциальном законе его распре-

деления может рассматриваться как  $\hat{X}$ , а среднее время безотказной работы системы или интенсивность отказов — как характеристика  $\mu$

надежности системы. Здесь  $\hat{X}$  и  $\mu$  скалярные величины. При исследовании точности СС в качестве  $\hat{X}$  часто используется вектор отклонений переменных состояния системы от расчет-

ных значений. Если закон распределения  $\hat{X}$  многомерный нормальный, то в качестве характеристик точности системы рассматриваются параметры распределения — вектор математического ожидания и корреляционная матрица  $\hat{X}$ . Из этих параметров составляется матрица характеристик точности СС  $\mu$  (как это делается показано в приведенном ниже примере).

До проведения натурных испытаний опытных образцов получена априорная оценка  $\mu_a$  характеристик системы  $\mu$ .

Результаты натурных испытаний  $N_0$  опытных образцов представлены выборкой  $X_i, i = \overline{1, N_0}$ .

Необходимо получить комбинированную оценку  $\mu_k$  исследуемых характеристик СС, учитывающую результаты априорных исследований ее качества и данные, полученные в процессе испытаний опытных образцов.

### Определение комбинированных оценок характеристик системы

Поскольку достоверную информацию о фактических значениях характеристик СС несут результаты испытаний ее опытных образцов, то, как и в методе приоритета опытной информации, полагается, что значимость априорной информации должна зависеть от ее близости к данным, полученным в процессе испытаний [12]. В качестве меры, характеризующей эту бли-



зость, рассматривается величина отношения правдоподобия, используемого для проверки многомерной статистической гипотезы  $H: \mu = \mu_a$  о равенстве характеристик СС  $\mu$  априорной оценке  $\mu_a$  [13].

Для определения отношения правдоподобия сначала по результатам испытаний опытных образцов находится оценка максимального правдоподобия  $\mu_o$  величины  $\mu$ :

$$\mu_o = \arg \max_{\mu} \prod_{i=1}^{N_o} \varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \mu), \quad (2)$$

где  $\prod_{i=1}^{N_o} \varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \mu)$  — функция правдоподобия, полученная по выборке  $\mathbf{X}_i, i = \overline{1, N_o}$ .

Тогда величина отношения правдоподобия для проверки гипотезы  $H$  вычисляется по формуле

$$v = \frac{\prod_{i=1}^{N_o} \varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \mu) \Big|_{\mu=\mu_a}}{\prod_{i=1}^{N_o} \varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \mu) \Big|_{\mu=\mu_o}} = \frac{\prod_{i=1}^{N_o} \varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \mu_a)}{\prod_{i=1}^{N_o} \varphi_{\hat{X}}(\mathbf{X}_i; \mu_o)}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что  $v$  изменяется в диапазоне от 0 до 1. Чем она больше, тем ближе априорная оценка  $\mu_a$  к результатам испытаний, следовательно, тем больше должен быть ее вес в комбинированной оценке. Условие  $v \approx 1$  говорит о практическом совпадении результатов априорных и опытных исследований качества СС и принадлежности всех имеющихся данных к одной генеральной совокупности. И, наоборот, при  $v \approx 0$  полагается, что априорная информация противоречит результатам натурных испытаний, и ее влияние на комбинированную оценку должно нивелироваться.

С учетом вышесказанного рассматривается функционал

$$J = \text{tr} \left\{ (\mu_o - \mu)^T (\mu_o - \mu) + v (\mu_a - \mu)^T (\mu_a - \mu) \right\}, \quad (4)$$

где верхний индекс "Т" обозначает операцию транспонирования;  $\text{tr}\{\cdot\}$  — функция вычисления следа матрицы.

Комбинированная оценка  $\mu_k$  характеристик СС  $\mu$  определяется из условия минимума функционала (4), т. е.

$$\mu_k = \arg \min_{\mu} J.$$

Необходимое условие минимума  $J$ , полученное путем дифференцирования скалярной функции по матричному аргументу [14], имеет вид

$$\frac{\partial J}{\partial \mu} \Big|_{\mu = \mu_k} = -2(\mu_o - \mu_k) - 2v(\mu_a - \mu_k) = 0$$

и дает уравнение, из которого находится комбинированная оценка вектора  $\mu$ :

$$\mu_k = \frac{\mu_o + v\mu_a}{1 + v}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что при  $v \approx 1$   $\mu_k \approx \frac{\mu_o + \mu_a}{2}$ , а при  $v \approx 0$   $\mu_k \approx \mu_o$ . При значениях отношения правдоподобия  $0 < v < 1$  комбинированная оценка представляет взвешенную сумму априорной и опытной оценок характеристик СС.

Если положить, что величина  $v$  неслучайная, а априорная и опытная оценки характеристик системы несмещенные, то и комбинированная оценка (5) также будет несмещенной, т. е.

$$\begin{aligned} M[\mu_k] &= M \left[ \frac{\mu_o + v\mu_a}{1 + v} \right] = \frac{M[\mu_o] + vM[\mu_a]}{1 + v} = \\ &= \frac{\mu + v\mu}{1 + v} = \mu, \end{aligned}$$

где  $M[\cdot]$  — оператор математического ожидания.

При тех же условиях корреляционная матрица оценки  $\mu_k$

$$\mathbf{K}_{\mu_k} = \frac{1}{(1 + v)^2} (\mathbf{K}_{\mu_o} + v^2 \mathbf{K}_{\mu_a}),$$

где  $\mathbf{K}_{\mu_k}$ ,  $\mathbf{K}_{\mu_o}$  и  $\mathbf{K}_{\mu_a}$  — корреляционные матрицы оценок  $\mu_k$ ,  $\mu_o$  и  $\mu_a$  соответственно.

Если известны матрицы  $\mathbf{K}_{\mu_o}$  и  $\mathbf{K}_{\mu_a}$ , то для исследования влияния априорной информации на точность оценивания характеристик СС, можно использовать след корреляционной матрицы  $\mathbf{K}_{\mu_k}$  комбинированной оценки  $\mu_k$

$$\text{tr} \mathbf{K}_{\mu_k} = \frac{1}{(1 + v)^2} (\text{tr} \mathbf{K}_{\mu_o} + v^2 \text{tr} \mathbf{K}_{\mu_a}) \quad (6)$$

и сравнить его со следом корреляционной матрицы  $\mathbf{K}_{\mu_o}$  опытной оценки  $\mu_o$ .

Тогда выполнение условия  $\text{tr } \mathbf{K}_{\mu_k} < \text{tr } \mathbf{K}_{\mu_o}$  будет свидетельствовать о более высокой точности комбинированной оценки характеристик СС по сравнению с опытной оценкой. Можно показать, что, если корреляционные матрицы  $\mathbf{K}_{\mu_o}$  и  $\mathbf{K}_{\mu_k}$  удовлетворяют неравенству

$$\text{tr } \mathbf{K}_{\mu_k} < \frac{2+v}{v} \text{tr } \mathbf{K}_{\mu_o}, \quad (7)$$

то комбинированная оценка характеристик СС точнее опытной. Из последнего условия видно, что даже при значительных отличиях величин  $\mathbf{K}_{\mu_o}$  и  $\mathbf{K}_{\mu_k}$ , определяющих качество априорных и опытных оценок, учет априорной информации позволяет в большинстве случаев повысить точность оценивания характеристик системы.

Если корреляционная матрица  $\mathbf{K}_{\mu_a}$  априорной оценки  $\mu_a$  не известна, то, полагая, что  $\mu_a$  — величина неслучайная, из формулы (6) можно получить уравнение

$$\text{tr } \mathbf{K}_{\mu_k} = \frac{\text{tr } \mathbf{K}_{\mu_o}}{(1+v)^2},$$

из которого следует, что всегда  $\text{tr } \mathbf{K}_{\mu_k} \leq \text{tr } \mathbf{K}_{\mu_o}$ , поскольку отношение правдоподобия  $v \geq 0$ .

#### Пример применения метода при многомерном нормальном законе распределения

Рассматривается сложная система. Одним из основных функциональных свойств ее целевого применения является точность.

Состояние системы в некоторый фиксированный момент времени характеризуется  $n$  независимыми координатами (переменными состояниями), распределенными по многомерному нормальному закону. Погрешность функционирования СС определяется величиной вектора  $\hat{\mathbf{X}}$ , элементами которого являются отклонения переменных состояния системы от расчетных значений.

В качестве характеристик точности СС, подлежащих оцениванию, используются математическое ожидание  $\mathbf{M}$  и корреляционная матрица  $\mathbf{K}$  вектора  $\hat{\mathbf{X}}$  в заданный момент времени.

По результатам исследований СС, предшествующих испытаниям опытных образцов, получены априорные оценки характеристик точности: оценка  $\mathbf{M}_a$  математического ожидания и оценка  $\mathbf{K}_a$  корреляционной матрицы вектора отклонений переменных состояния системы от расчетных значений.

Проведены натурные испытания  $N_o$  опытных образцов системы, в результате которых получены значения  $\mathbf{X}_i, i = \overline{1, N_o}$ , вектора  $\hat{\mathbf{X}}$ .

Необходимо получить комбинированные оценки  $\mathbf{M}_k$  и  $\mathbf{K}_k$  характеристик точности СС  $\mathbf{M}$  и  $\mathbf{K}$ , учитывающие результаты априорных исследований и натурных испытаний опытных образцов.

В соответствии с предложенным методом сначала по выборке  $\mathbf{X}_i, i = \overline{1, N_o}$ , определяются опытные оценки математического ожидания  $\mathbf{M}$  и корреляционной матрицы  $\mathbf{K}$  методом максимального правдоподобия. Они имеют вид [15]:

$$\mathbf{M}_o = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} \mathbf{X}_i;$$

$$\mathbf{K}_o = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} (\mathbf{X}_i - \mathbf{M}_o)(\mathbf{X}_i - \mathbf{M}_o)^T.$$

Далее для решения поставленной задачи необходимо перейти к введенным ранее обозначениям.

Поскольку характеристики точности СС  $\mathbf{M}$  и  $\mathbf{K}$  являются соответственно вектором-столбцом и симметричной матрицей, то многомерная величина (в данном случае матрица)  $\mu$ , характеризующая точность системы, будет состоять из

вектора  $\mathbf{M}$  и матрицы  $\mathbf{K}$ :  $\mu = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \\ \mathbf{K} \end{bmatrix}$ . Например,

при размерности  $n = 2$ :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}$$

и

$$\mu = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \\ \mathbf{K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}.$$

Соответственно, априорная оценка характеристик точности СС  $\mu_a = \begin{bmatrix} M_a^T \\ K_a \end{bmatrix}$ , опытная оценка  $\mu_o = \begin{bmatrix} M_o^T \\ K_o \end{bmatrix}$  и комбинированная оценка  $\mu_k = \begin{bmatrix} M_k^T \\ K_k \end{bmatrix}$ .

Подставив выражения для  $\mu_a$ ,  $\mu_o$  и  $\mu_k$  в формулу (5), будем иметь

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_k^T \\ K_k \end{bmatrix} &= \frac{1}{1+v} \left( \begin{bmatrix} M_o^T \\ K_o \end{bmatrix} + v \begin{bmatrix} M_a^T \\ K_a \end{bmatrix} \right) = \\ &= \frac{1}{1+v} \begin{bmatrix} (M_o + vM_a)^T \\ K_o + vK_a \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Приравняв соответствующие элементы матриц в левой и правой частях этого уравнения, получим комбинированные оценки характеристик точности СС:

$$\begin{aligned} M_k &= \frac{M_o + vM_a}{1+v}; \\ K_k &= \frac{K_o + vK_a}{1+v}. \end{aligned} \quad (8)$$

Величина отношения правдоподобия для проверки многомерной статистической гипотезы  $H: \mu = \mu_a$  или, что то же самое,  $H: M = M_a$ ,  $K = K_a$  определяется по известной формуле [16]

$$\begin{aligned} v &= |K_o K_a^{-1}|^{N_o/2} \times \\ &\times \exp \left\{ \frac{N_o}{2} \left[ n - \text{tr}(K_o K_a^{-1}) - \right. \right. \\ &\left. \left. - (M_o - M_a)^T K_a^{-1} (M_o - M_a) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Пусть, например, при  $n = 2$  заданы априорные оценки  $M_a = [1, 2 \ 1, 2]^T$ ,  $K_a = \begin{bmatrix} 1,44 & 0,72 \\ 0,72 & 1,44 \end{bmatrix}$  характеристик точности системы  $M$ ,  $K$  и опытные оценки  $M_o = [1 \ 1]^T$ ,  $K_o = \begin{bmatrix} 1 & 0,5 \\ 0,5 & 1 \end{bmatrix}$  этих характеристик, полученные методом максимального правдоподобия по результатам  $N_o = 11$  натурных испытаний. Найдем комбинированные оценки  $M_k$  и  $K_k$  параметров  $M$  и  $K$ .

Подставив исходные данные в формулу (9), найдем величину отношения правдоподобия  $v = 0,4259$ , характеризующую близость результатов априорных исследований характеристик точности системы к опытным данным, полученным по результатам испытаний.

В этом случае комбинированные оценки в соответствии с формулами (8) будут иметь вид:

$$M_k = [1,06 \ 1,06]^T;$$

$$K_k = \begin{bmatrix} 1,14 & 0,57 \\ 0,57 & 1,14 \end{bmatrix}.$$

Сравнение полученных оценок с априорными и опытными оценками характеристик точности системы подтверждает реализацию в предложенном подходе взвешенного учета имеющихся исходных данных о точности СС.

Качество опытной оценки  $M_o$  математического ожидания  $M$  можно приближенно оценить по величине  $K_{M_o} \approx K_o / N_o$ . Тогда из формулы (7) получается условие  $\text{tr} K_{M_o} < 5,7 \text{tr} K_{M_a}$ , из которого видно, что даже при достаточно грубой априорной информации о точности системы можно получить выигрыш в качестве оценивания ее характеристик.

## Заключение

Предложенный метод комплексирования априорной и опытной информации при оценивании характеристик сложных систем требует минимальной априорной информации в виде точечных оценок соответствующих характеристик. В отличие от большинства известных методов, полученные на его основе комбинированные оценки учитывают результаты априорных исследований и натурных испытаний опытных образцов системы с весовыми коэффициентами, зависящими от близости данных, полученных на различных этапах исследования системы.

Следует отметить, что комбинированная оценка (5) для некоторых распределений величины  $\hat{X}$  (экспоненциального, Пуассона, биномиального, Рэлея, Максвелла и некоторых других), используемых при решении различных практических задач, связанных с исследованием характеристик СС, совпадает с оценками, полученными методом ПОИ. В то же время при

нормальном и логнормальном законах распределения, распределении Паскаля,  $\gamma$ -распределении и ряде других законов распределения формулы отличаются. Это связано с тем, что предлагаемый метод, в отличие от метода приоритета опытной информации и байесовских процедур оценивания, не привязан к конкретному виду распределения априорной оценки характеристик СС. Подход остается неизменным при любых априорных распределениях. Более того, для получения комбинированных оценок характери-

стик системы не требуется численно решать нелинейные уравнения, как в методе ПОИ, например, при  $\chi$ -распределении,  $\gamma$ -распределении,  $\beta$ -распределении и некоторых других законах распределения величины  $\hat{X}$  [17].

В силу простоты и универсальности предложенного подхода метод может быть широко использован при исследовании свойств сложных систем в условиях ограничений на проведение испытаний опытных образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **Буренок В. М., Найденов В. М.** Испытательная база: выход из кризиса // Воздушно-космическая оборона. 2009. № 1(44). С. 18—25.
3. **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.
4. **Рыжиков Ю. И.** Имитационное моделирование. Теория и технологии. — СПб.: КОРОНА принт; — М.: Альтекс-А, 2004. — 384 с.
5. **Шаракшанэ А. С., Халецкий А. К., Морозов И. А.** Оценка характеристик сложных автоматизированных систем. — М.: Машиностроение, 1993. — 272 с.
6. **Арсеньев В. Н., Дубинин Д. П.** Обоснование метода оценивания характеристик сложных систем при ограниченном числе натурных испытаний // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу. 2020. № 2(146). С. 30—36.
7. **Пугачев В. С.** Теория вероятностей и математическая статистика. — М.: Физматлит, 2002. — 496 с.
8. **Пугачев В. Н.** Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. — М.: Сов. радио, 1973. — 256 с.
9. **Городецкий В. И. и др.** Элементы теории испытаний и контроля технических систем / под ред. Юсупова Р. М. — Л.: Энергия, 1978. — 192 с.
10. **Бондаренко В. А., Ярица А. И.** Сравнительный анализ априорной и апостериорной оценок точности плановой геодезической сети с помощью программного комплекса "Россия—Беларусь", разработанного в Полоцком государственном университете // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2014. № 16. С. 92—95.
11. **Арсеньев В. Н., Ардашов А. А., Силантьев С. Б., Ядренкин А. А.** Оценивание максимальной погрешности сложной системы по априорным и опытным данным // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 10. С. 855—863.
12. **Арсеньев В. Н., Силантьев С. Б., Хомоненко А. Д., Ададунов С. Е.** Определение вероятности выполнения задачи сложной системой при ограниченном объеме опытной информации: сб. докладов XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2018). — СПб.: Гос. электротехнический универс. "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). 2018. Т. 1. С. 43—46.
13. **Леман Э.** Проверка статистических гипотез. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. — 408 с.
14. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц. Изд. 4-е. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 552 с.
15. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: учебник для студ. вузов. Изд. 9. — М.: Издательский центр "Академия". 2003. — 576 с.
16. **Андерсон Т.** Введение в многомерный статистический анализ. — М.: Физматгиз, 1963. — 500 с.
17. **Арсеньев В. Н.** Оценивание характеристик систем управления по ограниченному числу натурных испытаний. — М.: Рестарт, 2013. — 126 с.

## **THE METHOD OF INTEGRATION OF THE DATA AT ESTIMATION OF COMPLEX SYSTEMS CHARACTERISTICS**

*V. N. Arseniev*

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

*E. Yu. Lushpa*

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

*The method of estimation of complex system characteristics under the data, received at various stages of its researches, is offered. Integration of all data is implementing with taking into account their affinity to the information received by test results of prototypes of system. The method demands the minimum aprioristic information and, unlike the majority of known methods, is not adhered to a concrete kind of distribution of aprioristic estimations of the system characteristics. The approach remains invariable at any aprioristic distributions. Owing to simplicity and universality it can widely be used at research of properties of complex systems in the conditions of restrictions on the trials of prototypes of system.*

*Keywords:* complex system, characteristics, integration of the data, the universal approach.

Bibliography — 17 references.

*Received July 11, 2022*



УДК 656.61.052

DOI: 10.52190/1729-6552\_2022\_3\_22

EDN: UHPJJE

## ТЕСТИРОВАНИЕ И ОТЛАДКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ФИЛЬТРА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РАБОТЫ В СУДОВЫХ СЕТЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

<sup>1</sup>А. С. Соболев; <sup>1, 2</sup>А. А. Зинченко; <sup>1</sup>В. В. Ениватов, канд. техн. наук<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Россия<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург, Россия

*В данной статье описывается создание активного фильтра, способного компенсировать электромагнитные помехи в цепях управления преобразователя частоты, а также проведено тестирование готового экспериментального образца на базе реального преобразователя частоты.*

**Ключевые слова:** активный фильтр, преобразователь частоты, электромагнитные помехи, тестирование, отладка.

В сложнотехнических системах, которые состоят из технически сложных потребителей, одной из значимых проблем является подверженность влиянию электромагнитных помех на стабильную работу системы. Одними из таких потребителей являются преобразователи частоты, влияние на них электромагнитных помех может привести к большому количеству негативных последствий, таких, как снижение энергоэффективности, ухудшение качества сигнала, снижение срока службы оборудования, а также к полному выходу оборудования из строя. Решением данной проблемы является использование различных фильтров для компенсации влияния электромагнитных помех на стабильную работу преобразователей частоты. Цель данной работы — реализация экспериментального образца активного фильтра, а также проведение его

тестирования на базе реального преобразователя частоты [1–3].

### Реализация активного фильтра

Реализация системы активной фильтрации была произведена внедрением контактной группы исполнительных элементов фильтра в цепь управления преобразователя частоты. При возникновении помех в данной цепи контактная группа замыкает нужную дорожку на землю, тем самым предотвращая короткое замыкание при одновременном открытии двух силовых ключей преобразователя частоты. Для того, чтобы гальванически развязать силовую часть схемы и систему управления были использованы оптопары. Принципиальная схема устройства активного фильтра изображена на рис. 1.

Для системы управления реализуемого устройства была выбрана отладочная платформа STM32F411. STM32F411E-DISCO представляет собой отладочную плату, на которой реализована возможность удобного изучения и эксплуатации микроконтроллера STM32F411, основанного на ядре ARM Cortex-M4.

На плате присутствует все необходимое для быстрого старта разработки: внутрисхемный программатор электронный компас ST-LINK/V2, гироскоп, аудио ЦАП с интегрированным драйвером динамиков класса D, ST MEMs цифровой микрофон, разъем USB OTG с micro-AB, светодиоды и кнопки.

**Соболев Александр Сергеевич**, аспирант кафедры "Судовые энергетические установки".

E-mail: sobolev.alexandr1496@gmail.com

**Зинченко Антон Александрович**, магистрант кафедры "Электрооборудование судов и автоматизация производства", инженер.

E-mail: eltel85@bk.ru

**Ениватов Валерий Владимирович**, доцент кафедры "Судовые энергетические установки".

E-mail: comvaleriy.enivatov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2022 г.

© Соболев А. С., Зинченко А. А., Ениватов В. В., 2022

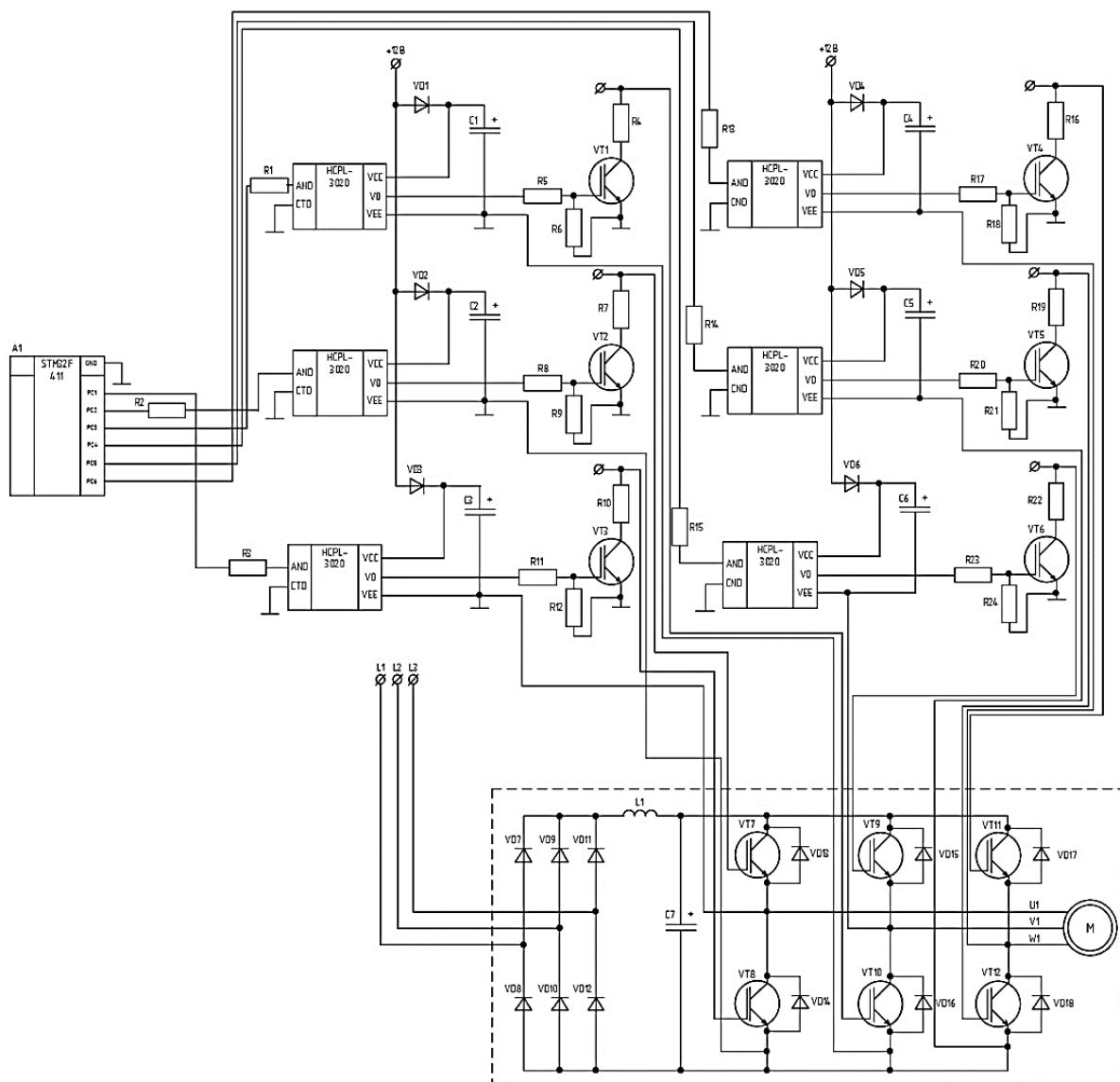


Рис. 1. Принципиальная схема устройства активного фильтра

**Особенности:**

- Комплекс бесплатного программного обеспечения для работы с платформой.
- Встроенный отладчик и программатор ST-LINK/V2;
- Питание внешнего приложения: 3 В и 5 В;
- Микроконтроллер STM32F411VET6, 32 бит, 100 МГц, ARM Cortex-M4, Flash 512 Кбайт, RAM 128 Кбайт;
- L3GD20: цифровой 3-осевой гироскоп;
- MP45DT02: всенаправленный цифровой микрофон;
- LSM303DLHC: цифровой 3-осевой 3D линейный датчик ускорения и цифровой 3-осевой магнитный датчик;
- CS43L22: аудио ЦАП с интегрированным усилителем класса D;

- Питание платы может осуществляться через USB шину либо от внешнего источника 5 В;
  - Разъемом USB OTG с micro-AB;
  - Восемь светодиодов: LD1 (красный/зеленый) для индикации USB обмена, LD2 (красный) индикация наличия питания 3.3 В, четыре пользовательских светодиода (LD3 (оранжевый), LD4 (зеленый), LD5 (красный) и LD6 (синий), два USB OTG два USB OTG (LD7 (зеленый) VBus и LD8 (красный) перегрузка по току);
  - Две кнопки: пользовательская и сброс;
  - Разъем расширения, который предоставляет доступ ко всем выводам микроконтроллера;
- Внешний вид отладочной платформы изображен на рис. 2.

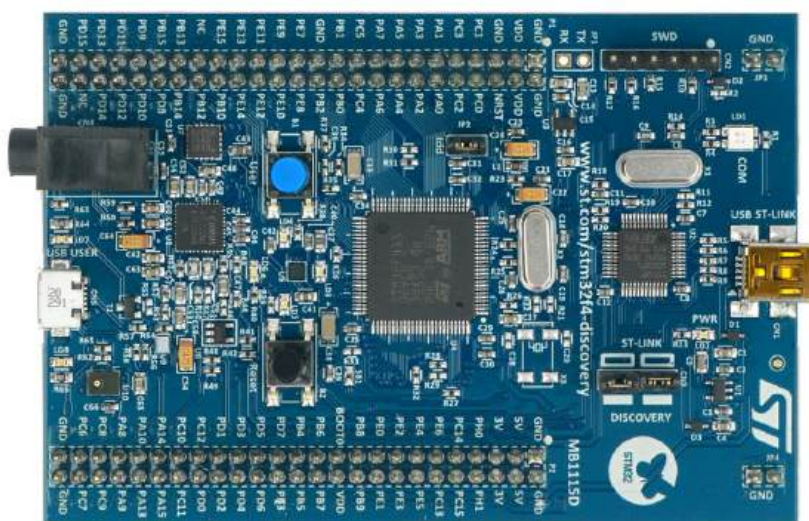


Рис. 2. Внешний вид отладочной платформы STM32F411E-DISCO

Для реализации исполнительной части устройства использовались оптопары HCPL-3020 для гальванической развязки от системы управления и MOSFET-транзисторы IRFD110PBF обладающие высокой быстродействием и подходящие под параметры системы.

HCPL-3020 состоит из светодиода GaAsP, который оптически связан с интегральной схемой с силового выходного каскада. Эти оптопары идеально подходят для управления IGBT и МОП-транзисторами, которые используются для коммутации питающего электропривод сигнала. Широкий диапазон рабочего напряжения выходного каскада, обеспечивается высокочастотными транзисторами в каскаде. Учитывая, рабочее напряжение и ток, данная оптопара идеально подходит для непосредственного управления IGBT малой или средней мощности.

Технические характеристики оптопары:

- Максимальный пиковый выходной ток 0,4 А
- Минимальный пиковый выходной ток 0,2 А
- Высокая скорость отклика: 0,7 мкс задержка по температурному диапазону
- Сверхвысокий CMR: минимум 10 кВ/мкс при  $V_{CM} = 1000$  В
- Самозагружаемый ток питания: максимум 3 мА
- Широкий диапазон рабочих температур: от  $-40$  °C до  $100$  °C
- Широкий рабочий диапазон  $V_{CC}$ : от 10 В до 30 В в диапазоне температур
- Доступны в корпусах DIP 8 и SO-8.
- Сертификаты безопасности: сертификат UL, 3750  $V_{RMS}$  в течение 1 минуты.
- Одобрение CSA
- Сертификация IEC/EN/DIN EN 60747-5-2
- $V_{ORM} = 630$  В<sub>пик</sub> (HCPL-3020).

Функциональная схема оптопары изображена на рис. 3.

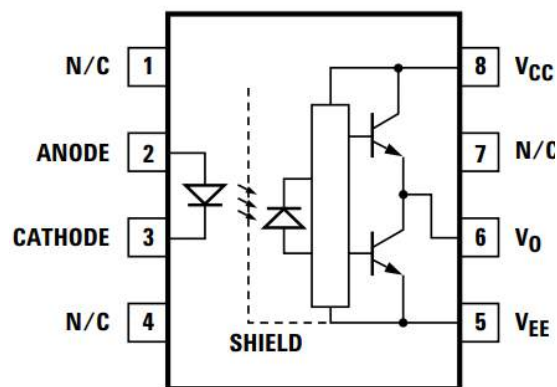


Рис. 3. Функциональная схема оптопары HCPL-3020

Внешний вид оптопары изображен на рис. 4.

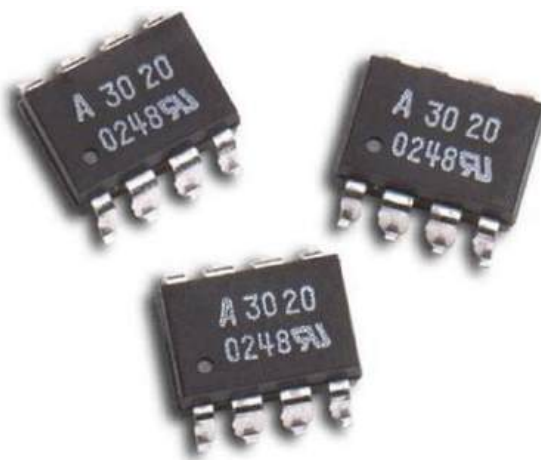


Рис. 4. Внешний вид оптопары HCPL-3020

MOSFET-транзисторы IRFD110PBF третьего поколения обеспечивают лучшее сочетание быстродействия и коммутирующих характеристик. Прочная конструкция устройства, низкое сопротивление во включенном состоянии и низкая цена [3—4]. 4-контактный DIP-корпус обеспечивает удобный и малогабаритный монтаж, что позволяет достичь малых размеров устройства. Двойной затвор служит тепловым отводом непосредственно на монтажную поверхность для повышения уровня рассеиваемой мощности до 1 Вт. Внешний вид транзистора показан на рис. 5.

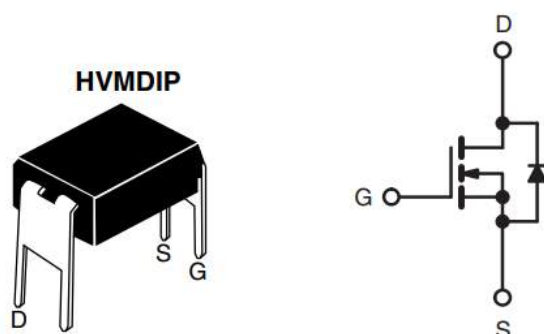


Рис. 5. MOSFET-транзистор IRFD110PBF

Для отслеживания исходного сигнала использовали датчики напряжения и тока CJMCU-219 на чипе INA219. Его внешний вид датчика показан на рис. 6.

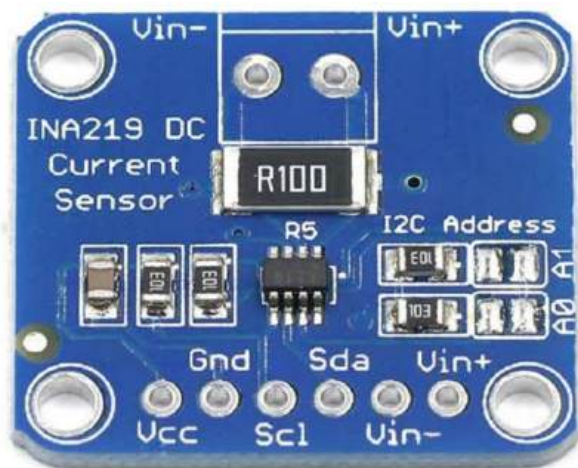


Рис. 6. Датчик напряжения и тока CJMCU-219 на чипе INA219

INA219 — это датчик напряжения, тока и мощности производства Texas Instruments. Данная микросхема позволяет с высокой точностью измерять напряжение в диапазоне 0—26 В и си-

лу тока. Подключение к микроконтроллеру осуществляется по протоколу I2C. Для работы микросхемы требуется небольшая обвязка, главный компонент которой — это шунтирующий резистор. Поэтому в использовании наиболее удобны модули, построенные на базе данной микросхемы, такие, как модуль CJMCU-219.

Модуль CJMCU-219, кроме самой микросхемы INA219, содержит все необходимые компоненты обвязки: шунтирующий резистор 0,1 Ом мощностью 2 Вт, подтягивающие резисторы для линий I2C и блокировочную ёмкость. Также на плате модуля имеются переключки, позволяющие изменить I2C адрес INA219, что может быть полезно при использовании нескольких модулей. CJMCU-219 легко подключается к Ардуино, Raspberry Pi и другим платам, а готовые библиотеки облегчают работу с ним. Всё это в совокупности с высокой точностью измерения и низким энергопотреблением делают датчик INA219 отличным выбором для систем мониторинга питания [5—7].

#### Характеристики CJMCU-219

Напряжение питания: от 3 до 5,5 В;

Потребляемый ток: не более 1 мА;

Диапазон измеряемых напряжений: от 0 до 26 В;

Максимальная измеряемая сила тока: 3.2 А;

Разрядность АЦП: 12 бит;

Погрешность измерений: не более 1 %;

Рабочая температура: от -25 до 85 °С;

Протокол: I2C. Режимы Fast-mode (400 кбит/с) и High-speed (3,4 Мбит/с);

Фильтрация: до 128 выборок для усреднения результата.

Результат сборки экспериментального образца активного фильтра показан на рис. 7.

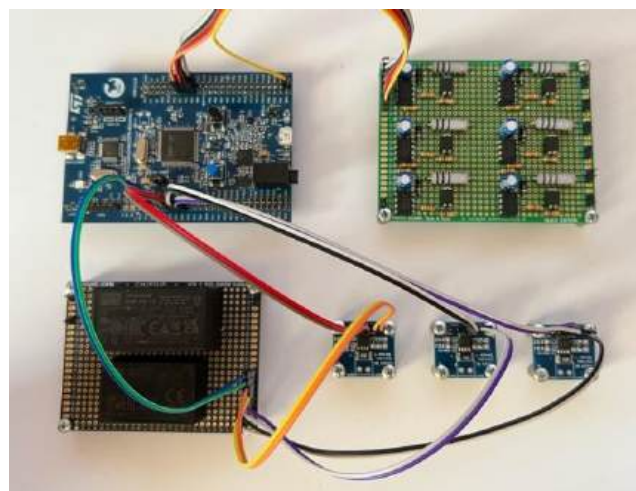


Рис. 7. Конечный вид экспериментального образца активного фильтра



### Тестирование и отладка физической модели

Тестирование проводилось с использованием преобразователя частоты ОВЕН ПЧВЗ. Образец активного фильтра был внедрен в управляющую цепь силовых ключей. В целях безопасного проведения опыта, нагрузка, а также непосредственно сами силовые ключи, были отключены. Внедрение помех в цепь производилось с помощью генератора импульсов. Для визуализации процесса работы использовали многоканальный осциллограф, который позволил увидеть сигнал до и после активного фильтра. Внешний вид всей лабораторной установки показан на рис. 8.

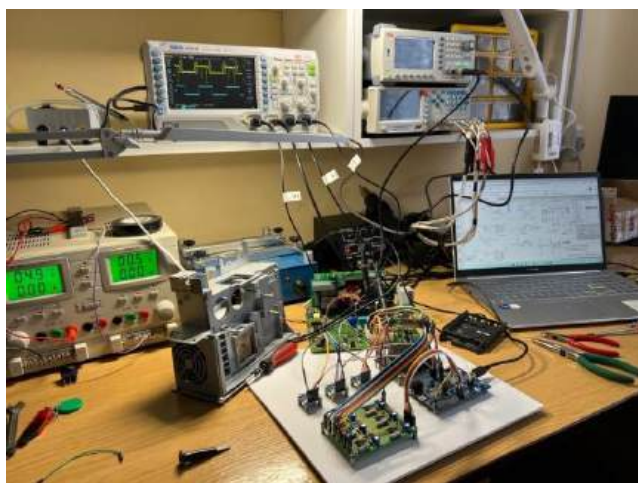


Рис. 8. Лабораторная установка для проверки работы модели активного фильтра

С помощью датчиков тока активный фильтр получал управляющий силовыми ключами сигнал с преобразователя частоты с уже наложенными на него помехами. Далее сигнал обрабатывался системой управления в лице отладочной платформы STM32F411E-DISCO, сравнивался с заранее заданным эталонным значением и при наличии отклонений от него фильтровался исполнительной частью устройства.

Осциллограмма, полученная при проведении тестирования активного фильтра, представлена на рис. 9.

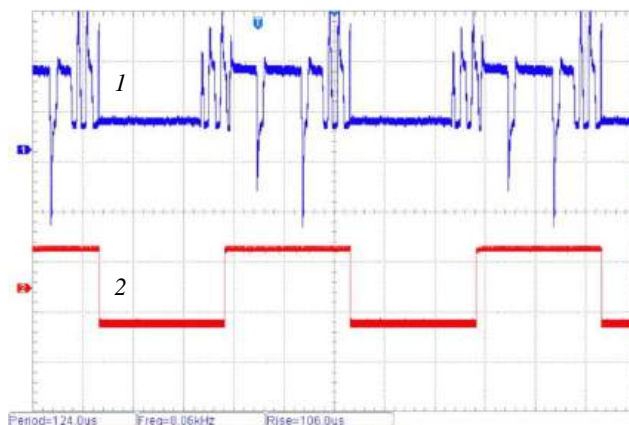


Рис. 9. Результаты тестирования (осциллограмма (кривая 1) — сигнал до обработки фильтром; осциллограмма (кривая 2) — сигнал после обработки активного фильтра)

Как можно увидеть, благодаря качественной настройке, активный фильтр значительно повышает качество выходного сигнала. Стоит отметить, что обработанный сигнал имеет немного завышенные параметры по сравнению с исходными, что может негативно влиять на работу устройства. Для устранения этой проблемы необходимо искусственное занижение параметров напряжения входного сигнала в целях компенсации этих значений на выходе.

### Выводы

В данной статье была произведена разработка и реализация экспериментальной модели активного фильтра, работающего в цепи управляющих сигналов преобразователя частоты. Система управления была реализована на основе отладочной платформы STM32F411E-DISCO, а силовая часть на основе высокоскоростных MOSFET-транзисторов IRFD110PBF. В качестве гальванической развязки силовой части от системы управления использовали оптопары HCPL-3020. Для обнаружения помех в цепи преобразователя частоты использовали датчики напряжения и тока CJMCU-219. Тестирование показало практически полную компенсацию помех, воздействующих на управляющие цепи преобразователя частоты.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вынгра А. В., Черный С. Г., Соболев А. С. Трехфазный силовой активный фильтр последовательного типа для компенсации воздействия периодической нагрузки электродвигателей: сб. статей III Всерос. науч.-техн. конф. "Состояние и перспективы развития современной науки по направлению "АСУ, информационно-телекоммуникационные системы". Анапа. 2021. С. 39—43.



2. **Соболев А. С., Черный С. Г., Ерофеев П. А.** Разработка имитационных моделей для точной настройки и отладки судовых преобразователей частоты // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 4. С. 95—104.
3. **Вынгра А. В., Соболев А. С., Черный С. Г.** Автоматизированная система управления электроприводами с интеграцией программируемых реле и активных фильтров // Труды Крыловского Государственного Научного Центра. 2021. С. 53—59.
4. **Tingting G., Yanqiang L., Dongdong C., Long X.** A novel active damping control based on grid-side current feedback for LCL-filter active power filter / 7th International Conference on Power and Energy Systems Engineering. 2020. P. 1319—1324. doi: 10.1016/j.egy.2020.11.027.
5. **Gabe I., Montagner VinHcius Foletto, Pinheiro H.** Design and implementation of a robust current controller for VSI connected to the grid through an LCL filter // IEEE Trans Power Electron. 2009. V. 24(6). P. 1444—52.
6. **Xianshun S., Yanan W.** Improvement of power quality in EAST power supply system based on hybrid active filter // Fusion Engineering and Design. 2020. V. 161. P. 1—9. doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.112076
7. **Wan B. N., Xu G. S.** Experimental advanced superconducting Tokamak // Chin. Sci. Bull. 2015. V. 60 (23). P. 2157—2168, <https://doi.org/10.1360/N972014- 01235>.

## **TESTING AND DEBUGGING OF AN EXPERIMENTAL SAMPLE OF THE FREQUENCY CONVERTER FILTER FOR OPERATION IN SHIP NETWORKS OF LIMITED POWER**

<sup>1</sup>A. S. Sobolev, <sup>1, 2</sup>A. A. Zinchenko, <sup>1</sup>V. V. Enivatov

<sup>1</sup> Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

*This article describes the creation of an active filter that can compensate for electromagnetic interference in the control circuits of a frequency converter, as well as testing a finished experimental sample based on a real frequency converter.*

**Keywords:** active filter, frequency converter, electromagnetic interference, testing, debugging.

**Bibliography** — 7 references.

*Received September 7, 2022*

УДК 658.5.012.2

DOI: 10.52190/1729-6552\_2022\_3\_28

EDN: UNAIWM

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТ ПО СЕРВИСНОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ В МЕСТАХ БАЗИРОВАНИЯ**

*М. Е. Дьячков*

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

*В статье описывается алгоритм мониторинга технического состояния изделий ВВТ, разработанный в рамках создания методики оперативно-производственного планирования производственного процесса сервисного обслуживания вооружения и военной техники. Описаны основные оценочные критерии для определения технического состояния условных групп из состава образца ВВТ, а также применение метода аддитивной свертки критериев для оценки общего технического состояния изделия.*

*Ключевые слова:* мониторинг технического состояния, ВВТ, условная группа, сервисное обслуживание, производственный процесс.

Сервисное обслуживание изделий вооружения и военной техники (ВВТ) является неотъемлемой частью их жизненного цикла на стадии эксплуатации и признано эффективным инструментом в поддержании боеготовности вооруженных сил Российской Федерации [1].

На основании заключенного с МО РФ государственного контракта и план-графика работ на календарный год предприятие-исполнитель гособоронзаказа направляет в воинскую часть бригаду специалистов для осу-

ществления работ по ремонту и техническому обслуживанию образцов ВВТ, обозначенных в план-графике или в уведомлении заказчика [1]. Работы проводятся на местах базирования ВВТ вдали от руководства и инфраструктуры предприятия, что несомненно затрудняет процесс планирования и организации производственного процесса.

В общем случае производственный процесс сервисного обслуживания ВВТ ПВО СВ представлен на рис. 1.



**Рис. 1. Производственный процесс сервисного обслуживания ВВТ ПВО СВ в войсковых условиях [2]**

Дьячков Максим Евгеньевич, аспирант.  
E-mail: ya\_max@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2022 г.

© Дьячков М. Е., 2022

Планирование работ по сервисному обслуживанию ВВТ производится централизованно посредством предоставления предприятию-исполнителю работ плана-графика, являющегося неотъемлемой частью государственного контракта, в котором обозначены изделия, подлежащие

обслуживанию, и сроки его выполнения. Данный документ формируется на основании сбора и анализа информации из воинских частей с учетом объема выделяемых бюджетных средств.

Практически всегда предприятию предлагается обслужить изделия ВВТ, невосстановимые в войсковых условиях. Данные ситуации возникают в результате ошибочного сбора информации с воинских частей или желания заказчика минимизировать затраты на восстановление образцов ВВТ. Однако предприятие, получив план-график работ от заказчика, должно провести мероприятия по осуществлению его ритмичного исполнения, а также проанализировать возможность и сроки восстановления предложенных изделий ВВТ. Одним из инструментов обеспечения ритмичного и непрерывного функционирования производственного процесса является оперативно-производственное планирование, неотъемлемой частью которого является инструмент мониторинга технического состояния изделий ВВТ.

**Понятие мониторинга технического состояния изделий ВВТ и его применение в процессе оперативно-производственного планирования производственного процесса сервисного обслуживания**

Согласно ГОСТ РВ 0101-001 – 2007 «Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения» под мониторингом технического состояния изделия военной техники понимается непрерывный или периодический контроль технического состояния изделия военной техники в целях выработки рекомендаций по его дальнейшей эксплуатации или снятию с эксплуатации для направления на заводской ремонт или утилизацию [3]. Непрерывный контроль за состоянием изделия ВВТ может быть осуществлен посредством использования допол-

нительных технических средств (датчиков), установленных в изделие и непрерывно передающих информацию в ситуационный центр [4]. Дорогостоящая установка и обслуживание данных систем может быть необходима для максимально оперативного реагирования на возникающие дефекты в изделиях ВВТ.

В рамках осуществления оперативно-производственного планирования производственного процесса сервисного обслуживания ВВТ на местах базирования процесс мониторинга необходим для осуществления анализа план-графика работ, пришедшего на согласование от Заказчика. Это в свою очередь призвано минимизировать вероятность выезда бригады специалистов на неремонтопригодные в войсковых условиях образцы ВВТ, тем самым способствует сохранению прибыли предприятия, которая может быть использована впоследствии для его развития.

Процесс мониторинга технического состояния ВВТ представляет собой сбор и обработку статистических данных (оценочных показателей) по следующим условным группам:

1. Спецчасть изделия ВВТ:

- Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) изделия
- Механические и гидравлические устройства спецчасти изделия (в том числе система жидкостного охлаждения РЭА);
- антенно-фидерная и волноводная системы;
- кабельная сеть спецчасти изделия.

2. Базовое шасси изделия ВВТ:

- система электропитания (СЭП) изделия;
- электрооборудование базового шасси;
- механические и гидравлические устройства шасси;
- кабельная сеть базового шасси изделия.

Варианты значений оценочных показателей технического состояния условных групп приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценочный показатель технического состояния, <i>K</i>	Значение оценочного показателя <i>K</i>
5	Условная группа технически исправна, не требует ремонта
4	Условная группа работоспособна с ограничениями. Требуется проведение регулировочно-настроечных работ и мелкого ремонта.
3	Условная группа технически неисправна. Требуется проведение ремонта в войсковых условиях с возможным заводским ремонтом отдельных узлов, блоков из состава спецчасти изделия.
2	Условная группа технически неисправна. Объемы необходимого ремонта, возможности воинской части не позволяют выполнить ремонт условной группы в войсковых условиях. Требуется проведение заводского ремонта.
1	Условная группа технически неисправна в результате: <ul style="list-style-type: none"> <li>1. Наличия повреждений аварийного характера;</li> <li>2. Наличия неустраняемых последствий пожара;</li> <li>3. Наличия фактов хищения комплектующих изделия в воинской части;</li> <li>4. Наличия иных факторов, не позволяющих принять изделие ВВТ на сервисное обслуживание согласно государственного контракта.</li> </ul>

Для оценки технического состояния изделия ВВТ в целом необходимо определить один критерий  $T$ , который должен формироваться из частных критериев  $K_{ij}$  оценки технического состояния условных групп. При этом необходимо учитывать, что наибольшее влияние на формирование критерия  $T$  оказывают показатели  $K_{ij}=1$  и  $K_{ij}=2$ . В первом случае, если техническое состояние одной из условных групп оценивается как  $K_{ij}=1$ , то изделие в целом не может быть принято для проведения сервисного обслуживания даже при удовлетворительном состоянии остальных систем изделия ВВТ. Во втором случае, при наличии хотя бы одной группы с оценочным показателем  $K_{ij}=2$ , изделие не может быть восстановлено на площадке базирования и требует ремонта в заводских условиях.

Критерий  $T$ , определяющий оценочный показатель общего технического состояния изделия ВВТ будет определяться посредством аддитивной свертки частных оценок, определяющих критерии  $K_{ij}$ . Данный метод применяется ввиду однородности свертываемых показателей и предполагает введение весовых коэффициентов для каждого частного критерия.

Самый большой вес будет иметь оценка  $K_{ij} = 1$ , ввиду наибольшего влияния на конечный показатель  $T$ . При этом, для применения аддитивной свертки необходимо первоначально применить метод нормализации частных критериев, посредством деления каждой оценки на максимальную оценку равную  $N_{ij} = 5$ . Нормализованные критерии с назначенными весовыми коэффициентами представлены в табл. 2.

Таким образом, критерий  $T$ , определяющий техническое состояние изделия ВВТ, будет представлять собой аддитивную свертку оценок, со-

ответствующих каждому из частных критериев  $K_{ij}$ . Математически данную свертку представим в виде формулы (1):

$$T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 \frac{\lambda_{ij} N_{ij}}{5}. \quad (1)$$

Определив наиболее весомыми оценками критериев  $K_{ij}$  значения  $N_{ij}=1$  и  $N_{ij}=2$ , приходим к выводу, что чем больше полученный в результате аддитивной свертки критериев коэффициент  $T$ , тем хуже техническое состояние изделия ВВТ и меньше вероятность успешного его восстановления на месте его базирования. Путем анализа и перебора различных вариантов получим, что при  $T < 0,12$  на изделии ВВТ возможно проведение сервисного обслуживания на месте его постоянной или временной дислокации. В остальных случаях требуется либо проведение заводского ремонта изделия, либо оформляется мотивированный отказ в принятии его на сервисное обслуживание.

Алгоритм мониторинга технического состояния представлен на рис. 2.

Сбор статистических данных о техническом состоянии условных групп должен осуществляться инженером производственно-диспетчерского бюро производственного подразделения на основании актов выполненных работ предыдущих периодов, данных, полученных от бригадиров выездных бригад и непосредственно из эксплуатирующих организаций. Далее проводится их обработка и занесение в базу данных, которая является информационным ядром при осуществлении оперативно-производственного планирования.

Таблица 2

Оценка критерия $N_{ij}$	Нормализованная оценка критерия $N_{ij}/5$	Вес оценки критерия, $\lambda_{ij}$	$\lambda_{ij} N_{ij}/5$
1	0,2	0,7	0,14
2	0,4	0,25	0,1
3	0,6	0,025	0,015
4	0,8	0,015	0,012
5	1	0,01	0,01



Рис. 2. Алгоритм мониторинга технического состояния изделий ВВТ

Оперируя имеющимися и периодически обновляемыми инженерным составом производственного подразделения, данными о техническом состоянии изделий ВВТ обслуживаемой номенклатуры, проводится тщательный анализ план-графика работ, поступившего на согласование в предприятие. В случае обнаружения изделий, которые по данным мониторинга не могут быть восстановлены в эксплуатирующей организации, производится уведомление заказчика и корректировка план-графика. Данные действия предотвращают возможность выезда бригады специалистов для проведения работ на изделиях, которые не могут быть восстановлены на местах дислокации и затрат собственных

средств предприятия на оплату понесенных расходов.

### Заключение

Применение мониторинга технического состояния позволяет на этапе согласования руководящих документов отсеять априори невыполнимый объем работ. Данный инструмент является важной составляющей методики оперативно-производственного планирования производственного процесса сервисного обслуживания ВВТ на местах базирования и позволяет улучшить показатели его ритмичности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дьячков М. Е. Построение математической модели производственного процесса сервисного обслуживания вооружения и военной техники ПВО СВ в войсковых условиях при помощи аппарата сетей Петри // Русский инженер. 2021. № 04 (73). С. 33—36.
2. Дьячков М. Е., Кобелев П. А., Шевченко Р. В. Оперативно-производственное планирование производственного процесса сервисного обслуживания вооружения и военной техники ПВО // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России: межотраслевой научно-технический журнал. 2020, № 2, С. 46—50.
3. ГОСТ РВ 0101-001-2007 «Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения», М.: Стандартинформ.
4. Шунто В. Н., Татаров М. О., Догадов В. С. Автоматизированная система мониторинга состояния ВВСТ частей и подразделений ВКО // Техника средств связи. 2018. № 1(141). С. 278—280.

## **THE USAGE OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT TECHNICAL CONDITION MONITORING TOOL FOR PLANNING THE MAINTENANCE WORKS IN THE BASING PLACES**

*M. E. Dyachkov*

Independent Non-Profit Organization of Further Vocational Education

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

*This paper describes the algorithm for technical condition of weapons and military equipment monitoring tool developed as a part of scheduling technique used in maintenance production process. The main evaluation criteria used for determination of particular groups technical condition and the application of additive convolution method for the overall technical condition of weapons and military equipment determination are also described in this article.*

*Keywords:* technical condition monitoring, weapons and military equipment, particular group, maintenance, production process.

Bibliography — 4 references.

*Received September 15, 2022*

УДК 658.512.26:338.5  
DOI: 10.52190/1729-6552\_2022\_3\_33  
EDN: UOFAMZ

## **ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СРОКОВ И СТОИМОСТИ РАЗРАБОТКИ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Д. К. Щеглов*, канд. техн. наук

АО «Конструкторское бюро специального машиностроения», Санкт-Петербург, Россия  
ФГБОУ ВО Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

*А. Г. Сайбель*, д-р техн. наук

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

*Описан формализованный подход к формированию прогнозной оценки сроков и стоимости разработки военно-технических систем на основе метода аналогий и прототипов. Особенностью подхода является возможность определения баланса между потребной численностью инженерно-технических работников и приемлемым временем разработки системы.*

*Ключевые слова:* прогнозирование, подход, разработка, сроки, стоимость, военно-техническая система, метод аналогий, прототип.

Опытно-конструкторская работа (ОКР) — сложный процесс создания новых образцов техники, включающий формирование облика изделия, его структурно-параметрический синтез, а также разработку технологий изготовления и эксплуатации (применения по назначению).

Многообразие вариантов трансформации начального замысла работы в совокупность документально оформленных проектно-конструкторских и технологических решений, реализуемых в опытном образце, заставляет задаваться вопросом о продуктивных путях планирования ОКР на самых ранних этапах их постановки. При этом наибольшую сложность имеют процедуры оценивания потенциально потребных временных и интеллектуальных ресурсов для успешной реализации наукоемких инновационных проектов.

Мировая и отечественная практика свидетельствуют, что большая часть ОКР выполняется в целях совершенствования техники в границах

некоторого направления развития, в основе которого лежат принятая парадигма и принципы построения. При этом в рамках заданной структуры системного технического решения осуществляется поиск путей усовершенствования элементов и взаимодействия их совокупности.

Меньшая часть ОКР представляет собой поисковые работы, результатом которых должны стать прорывные решения, которые впоследствии будут новыми парадигмами и направлениями развития техники. В зарубежной практике такими работами, как правило, занимаются венчурные фонды, которые изначально опираются на стратегию, допускающую окупающийся проигрыш, т.е. заранее принимается допущение, что часть ОКР не достигнет заданной цели. При этом в стратегии венчурных фондов доля таких работ может существенно превышать половину.

Данная стратегия с 1958 г. успешно реализуется Агентством передовых оборонных исследовательских проектов в структуре Министерства обороны США — DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) [1] для обеспечения высокого научно-технического уровня применяемых технологий и технических систем военного и двойного назначения. DARPA выделяет финансовые средства коллективам ученых и инженеров в рамках инновационных проектов продолжительностью 3—5 лет. Причем около 60 % всех средств DARPA инвестирует в ОКР, имеющие высокие риски, но при этом и высокую отдачу в случае успеха [2].

---

**Щеглов Дмитрий Константинович**, начальник расчетно-исследовательского отделения, заведующий базовой кафедрой "Средства ВКО и ПВО".

E-mail: [\\_dk@bk.ru](mailto:_dk@bk.ru); [d.shcheglv@kbsm.su](mailto:d.shcheglv@kbsm.su)

**Сайбель Алексей Геннадиевич**, профессор.

E-mail: [saybel\\_ag@mail.ru](mailto:saybel_ag@mail.ru)

---

*Статья поступила в редакцию 17 августа 2022 г.*

© Щеглов Д. К., Сайбель А. Г., 2022

В Российской Федерации выполнение ОКР по созданию военно-технических систем (ВТСт) регулируется Федеральным законом от 29.12.2012 № 275-ФЗ "О государственном оборонном заказе" [3] не предусматривающим инвестирование высокорисковых проектов. Цены контрактов на выполнение ОКР, поставку опытных и серийных образцов ВТСт, выполнение других работ (услуг) в интересах Министерства обороны Российской Федерации определяются на основании технико-экономического обоснования (ТЭО). В качестве научно-методического аппарата ТЭО обычно используются сметно-нормативный (затратный/ресурсный) метод [4], метод аналогов и метод экспертных оценок. Указанные методы характеризуются, прежде всего, временем проведения анализа, точностью и степенью обоснованности прогнозируемой себестоимости выполнения ОКР [5]. При этом представляется очевидным, что стоимость полученных в результате ОКР результатов интеллектуальной деятельности, в том числе макетов, опытных образцов и объектов интеллектуальной собственности, а также реальная рыночная стоимость ВТСт, не может быть ниже себестоимости выполнения ОКР. В связи с этим для оценки результатов ОКР разработаны и широко применяются отдельные методы, в том числе методы воспроизведенной стоимости, стоимости замещения, исторической стоимости [6]. Понятия инвестиционной стоимости, себестоимости и рыночной стоимости выполнения ОКР по созданию ВТСт и полученных в процессе ОКР результатов являются предметом исследования современной теории экономической эффективности [7].

На практике форма представления расчетно-калькуляционных материалов по обоснованию цены продукции, поставляемой по государственному оборонному заказу (ГОЗ), регламентирована Приказом ФАС России от 26.08.2019 № 1138/19 [8], ориентированным на сметно-нормативный метод обоснования себестоимости. Данные формы позволяют обосновать фактические затраты на выполнение ОКР, связанные с созданием ВТСт, но не снимают всех вопросов по научному обоснованию прогнозной эффективности их выполнения. Важно подчеркнуть, что система прогнозных показателей эффективности ОКР всегда включает в себя априорную оценку себестоимости, потребных ресурсов (в частности, интеллектуальных) и сроков ее выполнения. Прежде всего это обусловлено тем, что недостижение плановых показателей эффективности ОКР по созданию ВТСт в большинстве случаев связано именно с рисками превыше-

ния сроков и финансовых затрат и только в исключительных случаях с невозможностью выполнения требований технического задания.

Разработка формализованного подхода к формированию прогнозной оценки сроков и стоимости выполнения ОКР требует рассмотрения механизма финансирования ГОЗ. В отличие от других ведущих промышленно развитых стран мира, в России преимущественное большинство ОКР по ГОЗ выполняется организациями оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Более 80 % организаций ОПК находятся в сфере деятельности Минпромторга России. При этом согласно отраслевой принадлежности почти 40 % организаций ОПК относятся к радиоэлектронной промышленности, около 20 % — к авиационной, а остальные примерно в равных долях — к судостроительной, обычных вооружений, боеприпасов и спецхимии, ракетно-космической отраслей [9].

Учредителем организаций ОПК России, как правило, является государство, что является одной из основных причин отличия структуры финансирования их деятельности от рыночной.

Учредителями организаций (предприятий, компаний), осуществляющих деятельность в рыночных условиях, стремятся к максимизации долгосрочной прибыли как разницы между реализационной ценой товара (или услуги) и его себестоимостью. Такая разница может быть увеличена за счет:

- повышения цены и расширения рыночной ниши за счет высокого потребительского качества и/или репутации товара (услуги);
- снижения себестоимости за счет совершенствования процессов производства и уменьшения издержек производства и продвижения товара (услуги) на рынке.

В случае же организаций ОПК государство не только авансирует выполнение ГОЗ и компенсирует все материальные затраты (сырье и материалы, покупные изделия, зарплаты, налоги, командировочные расходы и др.), возникающие при его исполнении, но и дополнительно выплачивает прибыль как фиксированный процент от себестоимости выполненной работы (10–20 %). Это часто приводит к отсутствию прямой заинтересованности организаций ОПК в снижении издержек, за исключением снижения затрат (платежей), осуществляемых из прибыли.

Тем не менее в связи с существенным сокращением объема ГОЗ наблюдается тенденция к заключению договоров (контрактов) на выполнение ОКР по созданию ВТСт на конкурсной основе [10]. Часто такие конкурсы организуются и проводятся посредством специализированных



электронных торговых площадок в формате аукционов. На аукцион выставляется лот, содержащий техническое задание на создание ВТСт, стартовую предельную цену договора и сроки его выполнения. При этом на практике часть конкурсов может проводиться формально, например, заведомо с расчетом на продление сроков выполнения работ. Это позволяет не допустить к выполнению ОКР "непроверенных" исполнителей. В таких условиях руководству организации ОПК с учетом текущей ситуации необходимо определиться с принципиальной возможностью участия в аукционе, а также с тем, насколько можно снизить цену выполнения работы. При этом необходимо оценить риски не уложиться в установленные сроки, учесть возможные штрафные санкции и т.п. Все это требует от организаций ОПК кардинального пересмотра традиционных методов ТЭО основных прогнозных показателей ОКР. Кроме того, задача, поставленная организациям ОПК Президентом РФ по доведению к 2025 г. доли выпускаемой продукции гражданского и двойного назначения до показателей не менее 30 %, а к 2030 г. — не менее 50 % [11], лишь подтверждает актуальность совершенствования механизмов экономического анализа перспективных ОКР.

Несмотря на широкое развитие и применение методов ТЭО основных прогнозных показателей ОКР при принятии решения о заключении договоров (контрактов) на выполнение ОКР по созданию перспективных уникальных ВТСт (как правило, превышающих по своим техническим характеристикам существующие российские и зарубежные аналоги, либо не имеющих прямых аналогов) всегда возникают сложности объективной оценки временных и финансовых ресурсов, необходимых для выполнения ОКР. Кроме того, представляется очевидным наличие некой нелинейной взаимосвязи между общим потребным для выполнения ОКР количеством ресурсов (интеллектуальных, информационных, материальных, финансовых, вычислительных и т. д.) и временем, которое нужно затратить на получение результатов интеллектуальной деятельности либо производство опытного образца.

Представим организацию (предприятие, компанию), выполняющую одновременно несколько ОКР одного профильного направления, в виде системы массового обслуживания, которая обрабатывает заявки (заказы) в режиме ограниченной пропускной способности. Тогда становится очевидной взаимосвязь между ценой (стоимостью) и временем выполнения работ или оказания услуг. Каждый заказ на выполнение ОКР

ставится в очередь, в которой за дополнительную плату можно продвинуться вперед, либо в системе есть постоянно свободные каналы обслуживания, которые при отсутствии заказов простаивают, но требуют финансовых затрат на содержание. В связи с этим актуальной задачей теории организации производства является разработка методики оптимизации процессов планирования и контроля сроков и качества (соответствия установленным требованиям) выполнения ОКР. Такая задача может быть сведена к анализу модели системы массового обслуживания, параметрическая оптимизация которой позволит минимизировать время задержки обслуживания. Единый подход к анализу функционирования таких систем массового обслуживания предполагает изначальную декомпозицию ОКР на составные части, исследование взаимосвязи которых должно стать фундаментом для предъявления обоснованных требований к структуре и значениям параметров модели.

Важно подчеркнуть, что потребность в формировании прогнозной оценки сроков и стоимости создания (модернизации или модификации) ВТСт возникает уже на стадии проработки тактико-технического задания государственного заказчика (заказчика) и заключения договора на выполнение ОКР. Результатом выполнения ОКР является разработка конструкторской и технологической документации на опытный образец ВТСт, изготовление и испытания этого образца (опытной партии) для организации промышленного (серийного) производства.

Изготовление ВТСт осуществляется, как правило, производственными предприятиями на основе рабочей конструкторской и иной документации, разработкой которой занимаются научно-исследовательские и проектные организации в рамках выполнения ОКР, проводимых на основании государственных контрактов. При наличии рабочей конструкторской документации оценка себестоимости производства опытного образца ВТСт не вызывает каких-либо сложностей. При дальнейшем массовом производстве себестоимость конечного продукта снижается за счет уменьшения вклада в финальную цену составляющих, определяемых процедурами планирования, организации, наладки и настройки технологического производственного цикла.

Более сложной задачей является оценка себестоимости создания результатов интеллектуальной деятельности, в том числе разработки конструкторской документации (КД) на ВТСт либо программного обеспечения.

Сложившаяся на предприятиях ОПК практика формирования ТЭО на разработку наукоем-

ких образцов ВТСт убедительно свидетельствует, что определение научно обоснованных значений переменных двухпараметрической модели ОКР — сроки и стоимость — занимает до двух недель. При этом в условиях стремительного возрастания конкуренции на рынке ВТСт за получение ГОЗ такие временные затраты на принятие решения о сроках, потребных ресурсах и стоимости выполнения разработки становятся неприемлемыми. Быстро изменяющаяся обстановка требует разработки и применения методов экспресс-оценки.

Следует отметить, что на предприятиях ОПК сохранились эксперты, которые, получив полчасика на размышления, могут дать оценку вектора "сроки — стоимость" с погрешностью не более 10–15 % от значений, выдаваемых через две недели финансово-экономическими службами. К сожалению, способ получения таких экспресс-оценок является нетиражируемым эмпирическим знанием, граничащим с интуицией, опирающейся на жизненный опыт и чувственное восприятие личных практических результатов.

Таким образом, актуальной является разработка научно-обоснованного механизма вычисления экспресс-оценок, который базируется на синтезе двух подходов: структурно-функционального и экспертного. В основе такого механизма целесообразно положить осмысление практики, поиск аналогий и прототипов, функциональную формализацию наблюдаемых статистических зависимостей.

В соответствии с [12] выполнение типовой ОКР предусматривает следующие стадии

1. Разработка проектной КД, включающая следующие этапы работ:

- разработку технического предложения,
- разработку эскизного проекта,
- разработку технического проекта.

2. Разработка рабочей КД, включающая разработку КД, а также испытания опытного образца (опытной партии), серийного производства, единичного производства.

При этом определенный нормативными документами порядок выполнения ОКР по созданию ВТСт не позволяет организовать равномерную загрузку специалистов проектных организаций в силу специфики каждого этапа работ: на стадии разработки проектной КД (особенно на этапе технического проектирования) требуются компетенции эрудированности и креативности; при разработке рабочей КД необходимы конструкторские компетенции и навыки оформления документации с соблюдением требований ЕСКД; создание опытного образца не-

возможно без инженерных умений и навыков (в ряде проектов на этом этапе приходится выявлять неучтенные на предшествующих этапах огрехи и находить нестандартные решения для их парирования и устранения); испытания опытного образца требуют знаний метрологии и системы мероприятий проверки соответствия качества объекта испытаний требованиям технического задания.

Рассмотрим возможный подход к оценке сроков, потребных интеллектуальных ресурсов и стоимости разработки ВТСт. Для этого этапы разработки КД в рамках ОКР представим множеством  $S = \{s_i\}_{i=1}^n$ , в котором:

- $s_1$  — разработка технического предложения;
- $s_2$  — разработка эскизного проекта;
- $s_3$  — разработка технического проекта;
- $s_4$  — разработка рабочей конструкторской документации.

Трудоемкость разработки КД на различных этапах ОКР по созданию ВТСт традиционно определяется, исходя из видов и объема выпущенных документов.

Виды и комплектность КД, выпускаемой на каждой  $s_i$ -стадии разработки, регламентированы [13], однако с точки зрения нормативов трудоемкости все виды технических документов можно описать следующим множеством

$$B = \{b_j\}_{j=1}^m :$$

- $b_1$  — схемы принципиальные;
- $b_2$  — чертежи;
- $b_3$  — инженерные расчеты;
- $b_4$  — текстовые документы;
- $b_5$  — прочие (в том числе электронные документы).

Каждому из перечисленных видов технических документов  $b_j$ , выпускаемых на  $s_i$ -стадии разработки, можно поставить в соответствие норматив трудоемкости  $u_j^{(i)}$  в нормо-часах или человеко-месяцах ( $165 \text{ н.-ч.} = 1 \text{ чел.-мес.}$ ), приведенный к формату документа на бумажном носителе (например, А1 или А4).

Для каждой стадии разработки  $s_i$  введем множество нормативов трудоемкости, где элементы  $u_j^{(i)}$  будут иметь размерность [А1 чел.-мес.].

Количество документации различных видов (типов), разработанных на каждой стадии  $s_i$ ,

зададим множеством  $q^{(i)} = \left\{ q_j^{(i)} \right\}_{j=1}^m$ , где элементы  $q_j^{(i)}$  будут иметь размерность [А1 шт.].

Тогда оценка нормативной трудоемкости каждой  $s_i$  стадии разработки  $\tilde{w}^{(i)}$  [чел.-мес.] выполняется следующим образом:

$$\tilde{w}^{(i)} = \sum_{j=1}^m u_j^{(i)} \tilde{q}_j^{(i)}, \quad (1)$$

где  $\tilde{q}_j^{(i)}$  — оценка количества форматов [А1 шт.], запланированных к выпуску на  $s_i$  стадии разработки. Эта оценка, как правило, определяется методом аналогий и прототипов в связи с отсутствием каких-либо других объективных методов. При этом применение данного метода не позволяет оценить потенциал коллектива, которому предстоит выполнить разработку ВТСт, не только потому, что работа другая, но и потому, что коллектив уже другой. В связи с этим актуальной задачей теории организации производства является совершенствование метода аналогий и прототипов применительно к оценке потребных интеллектуальных ресурсов и сроков разработки сложных наукоемких ВТСт.

Следует отметить, что в нормативах трудоемкости выполнения ОКР, применяемых на ряде предприятий отечественной промышленности, выражение (1) помножается на коэффициент сложности и новизны ОКР. Однако такой подход вносит дополнительную неопределенность в процесс оценки трудоемкости ОКР.

После оценки трудоемкости ОКР встает вопрос о привлечении необходимых для ее выполнения ресурсов, в том числе интеллектуальных (или трудовых), информационных, материальных, финансовых, вычислительных и т. д. Известно, что общее количество ресурсов  $\xi$ , требуемых для обеспечения реализации одного производственного цикла в рамках соответствующего бизнес-процесса [14], обратно пропорционально времени  $\tau$ , которое необходимо затратить на его реализацию. Следовательно, эффективность (комплексное свойство, включающее в себя результативность, оперативность и ресурсоёмкость) бизнес-процесса можно описать некой производственной функцией  $\Psi(\tau, \xi)$  [15].

В рассматриваемом случае основным ресурсом производственной функции  $\Psi(\tau, \xi)$  являются

инженерно-технические работники (ИТР) различных категорий и специализаций, привлекаемые на  $s_i$  стадии разработки ВТСт. Совокупность этих ИТР представим множеством

$$a^{(i)} = \left\{ a_\gamma^{(i)} \right\}_{\gamma=1}^k, \quad \text{где мощность этого множества}$$

$$|a^{(i)}| = a_\Sigma^{(i)} \text{ — общая численность ИТР.}$$

Если предположить, что загрузка ИТР в процессе выполнения ОКР является равномерной, то время реализации  $s_i$  стадии разработки оценивается величиной  $\tilde{\tau}^{(i)}$  [мес.]

$$\tilde{\tau}^{(i)} = \frac{\tilde{w}^{(i)}}{a_\Sigma^{(i)}}. \quad (2)$$

Однако каждая из стадий  $s_i$  включает в себя не только параллельно, но и последовательно выполняемые работы.

Если сопоставить работу конкретного специалиста в проектно-конструкторском коллективе с отдельным процессором в многопроцессорной системе, то оценить достигаемое повышение производительности труда коллектива ИТР за счет распараллеливания работ можно по аналогии с принятым в теории параллельных вычислений законом Дж. Амдала [16], Густавсона-Барсиса [17] и Сана-Ная [18].

Так в работе [19] приведено научное обоснование идеи применения закона Дж. Амдала [16] для оценки ускорения производительности коллектива ИТР при наличии последовательно и параллельно выполняемых проектно-конструкторских работ.

Коэффициент Амдала описывается следующим выражением [16]:

$$s_p = \left( \alpha + \frac{1-\alpha}{p} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — доля работ из всего объема, которая выполняется последовательно;

$1-\alpha$  — доля работ, которые могут быть распараллелены;

$p$  — число параллельно работающих процессоров (применительно к решаемой задаче — численность ИТР  $a_\Sigma^{(i)}$ ).

Графическое представление закона Дж. Амдала приведено на рис. 1.

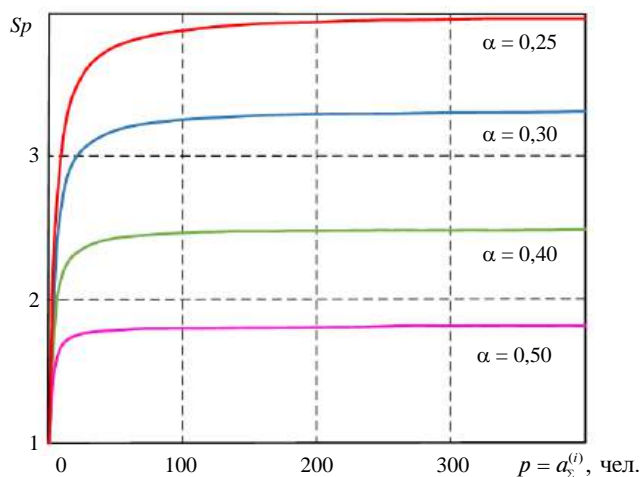


Рис. 1 Закон Дж. Амдала

С учетом выражения (3) выражение для оценки времени реализации  $s_i$ -стадии разработки (2) можно переписать следующим образом:

$$\tilde{\tau}^{(i)} = \frac{\tilde{w}^{(i)}}{a_{\Sigma}^{(i)} \left( \alpha^{(i)} + \frac{1 - \alpha^{(i)}}{a_{\Sigma}^{(i)}} \right)}, \quad (4)$$

где  $\alpha^{(i)}$  — доля из всего объема работ каждой  $s_i$ -стадии разработки, которые выполняются последовательно. Коэффициент  $\alpha^{(i)} = [0,1 \div 0,6]$  определяется методом аналогий и прототипов исходя из плана выполнения работ, комплектности и объема разрабатываемых документов.

Однако выражение (4) не учитывает потери времени на координацию работ между различными руководителями и специалистами в составе коллектива ИТР.

Еще в 1913 г. французским инженером М. Рингельманом было установлено, что различные межличностные процессы снижают общую производительность группы по мере увеличения ее размера [20]. Данное наблюдение, получившее название эффект Рингельмана, впоследствии подтверждено немецким ученым О. Келером на примере командных спортивных мероприятий, а также Б. Латейном (феномен невмешивающегося свидетеля, 1979 г.). Анализ оригинальных исследований, проведенных Рингельманом, посвящена работа [21]. Тем не менее в научной литературе отсутствует какое-либо формализованное описание подобного эффекта применительно к многочисленным кол-

лективам ИТР, выполняющим ОКР по созданию сложной наукоемкой продукции.

В этой связи в целях формирования более точной оценки времени реализации  $s_i$ -стадии разработки  $\tilde{\tau}^{(i)}$  авторами предлагается ввести коэффициент  $\varphi^{(i)}$ , учитывающий потери времени, связанные с долей работ, которые следует дополнительно затратить на координацию параллельных процессов и согласование результатов. С учетом введенного коэффициента выражение (4) примет вид

$$\tilde{\tau}^{(i)} = \frac{\tilde{w}^{(i)}}{a_{\Sigma}^{(i)} \varphi^{(i)} \left( \alpha^{(i)} + \frac{1 - \alpha^{(i)}}{a_{\Sigma}^{(i)}} \right)}. \quad (5)$$

Зависимость коэффициента потери времени на координацию параллельных процессов и согласование результатов  $\varphi^{(i)}$  от численности коллектива ИТР  $a_{\Sigma}^{(i)}$  представим в виде кривой третьего порядка, которую в целях краткости изложения назовем законом Щеглова—Сайбея:

$$\varphi(a) = \varphi_{\min} - \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{1 + e^{A-B \cdot a}}, \quad (6)$$

Применительно к проектной организации ОПК машиностроительного профиля параметры выражения (6) будут иметь следующие значения:  $\varphi_{\max} = 1$ ,  $\varphi_{\min} = 0,25$ ,  $A = 6$  и  $B = 0,05$ . Определение значений параметров выражения (6) для предприятий других типов требует проведения дополнительных исследований.

Графическое представление закона Щеглова—Сайбея представлено на рис. 2.

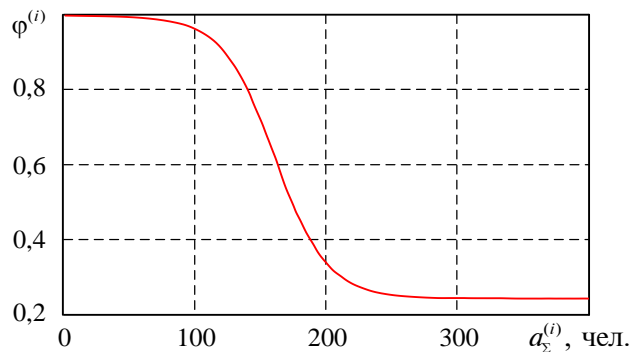


Рис. 2 Закон Щеглова—Сайбея

Представленный на рис. 2 график имеет несколько непривычную форму для характеристики системного свойства, имеющего зависимость от затрачиваемого ресурса. Третий порядок кривой обусловлен сложностью рассматриваемого свойства, на изменения которого одновременно влияет множество разнородных факторов.

Для описания природы явления целесообразно рассмотреть следующую аргументацию. Если работу выполняет один специалист, то интенсивность его деятельности можно описать нормальным законом распределения. Если два — тоже нормальным законом, но с математическим ожиданием, равным полусумме математических ожиданий двух законов распределения. Если в проекте принимает участие множество ИТР, то они начнут тратить время и силы на согласование действий, обмен опытом и т.п. По этой причине производительность при большом числе ИТР падает: множество участников процесса создания ВТСт формируют иерархическую структуру, часть которой выполняет не только проектно-конструкторские функции, но и организационно-технические.

Рост численности ИТР приводит к увеличению числа уровней иерархии и дальнейшему снижению производительности с повышенной скоростью. Но если нелинейная кривая имеет отрицательную производную, причем с растущей интенсивностью, то рано или поздно она должна достичь нулевого значения, что является нарушением граничных условий рассматриваемой прикладной задачи: такая система (с нулевым коэффициентом полезного действия) не выполняет возложенную на нее функцию и соответственно не может существовать на практике. Следовательно, в качестве граничного условия необходимо принять  $\lim_{a_{\Sigma} \rightarrow \infty} \varphi^{(i)} = C > 0$ .

Иными словами, производительность коллектива ИТР падает, но не до нуля, что обуславливает необходимость выбора в качестве функции для описания этого явления логистической кривой.

Если время каждой  $s_i$ -стадии разработки задано  $\tau_{\partial}^{(i)}$ , то из условия  $\tilde{\tau}^{(i)} = \tau_{\partial}^{(i)}$  и соотношения (5) можно определить численность специалистов  $\tilde{a}_{\Sigma}^{(i)}$ , необходимую для реализации  $s_i$ -стадии разработки,

$$\tilde{a}_{\Sigma}^{(i)} = \frac{\tilde{w}^{(i)} \varphi^{(i)} (1 + \alpha^{(i)})}{\tau_{\partial}^{(i)} + \alpha^{(i)} \tilde{w}^{(i)} \varphi^{(i)}}. \quad (6)$$

С учетом приведенных рассуждений, опираясь на выражение (5), можно перейти от оценки нормативной трудоемкости  $\tilde{w}^{(i)}$  к оценке результирующей трудоемкости

$$\begin{aligned} \tilde{w}_{\text{рез}}^{(i)} &= \frac{\tilde{w}^{(i)}}{\varphi^{(i)} \left( \alpha^{(i)} + \frac{1 - \alpha^{(i)}}{a_{\Sigma}^{(i)}} \right)} = \\ &= \frac{\tilde{w}^{(i)} a_{\Sigma}^{(i)}}{\varphi^{(i)} \left( \alpha^{(i)} (a_{\Sigma}^{(i)} - 1) + 1 \right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

При выполнении широкомасштабных ОКР каждая  $s_i$ -стадия проектирования может начинаться в  $T_{\xi}$  году и продолжаться  $l$  лет, где  $\xi = \overline{1, l}$  — номер года. В этом случае себестоимость собственных работ по выпуску документации на  $s_i$ -стадии проектирования  $C_{cp}^{(i)}$  рассчитывается исходя из объемов работ и нормативов каждого  $T_{\xi}$  года:

$$C_{cp}^{(i)} = \sum_{\xi=1}^l \left( c_{\text{чм}}^{(\xi)} \tilde{w}_{\xi}^{(i)} \left( 1 + k_{\text{св}} + k_{\text{нр}}^{(\xi)} \right) \prod_{\xi=1}^l \text{def}_{\xi} \right), \quad (8)$$

где  $c_{\text{чм}}^{(\xi)}$  — средняя себестоимость человеко-месяца в  $T_{\xi}$  году;

$k_{\text{св}}$  — социальные выплаты (например, при социальных выплатах, составляющих 31,9% от фонда оплаты труда  $k_{\text{св}} = 0,319$ );

$k_{\text{нр}}^{(\xi)}$  — накладные расходы в  $T_{\xi}$  году;

$\text{def}_{\xi}$  — индекс-дефлятор, соответствующий  $T_{\xi}$  году ( $\text{def}_1 = 1$ ). Индекс-дефлятор устанавливается Приказом Минэкономразвития России [22].

Величины  $c_{\text{чм}}^{(\xi)}$  и  $k_{\text{нр}}^{(\xi)}$  определяются исходя из согласованных нормативов базового года и установленных коэффициентов дефляторов.

С учетом того, что каждая последующая  $s_{i+1}$ -стадия разработки начинается только после окончания предыдущей  $s_i$ -стадии, основные показатели ОКР определяются как сумма соответствующих показателей, входящих в ОКР стадий.

Зная себестоимость собственных работ можно определить и другие прогнозные показатели выполнения проектно-конструкторских работ, такие как [23]:

– средняя производительность ИТР, занятых выпуском КД [А1/год]

$$P^{cp} = \frac{\tilde{w}^{(i)}}{\tilde{a}_{\Sigma}^{(i)}}; \quad (9)$$

– средняя стоимость одного формата А1 (или А4)  $C_{\Phi}^{cp}$  [руб.] в хозяйственной цене

$$C_{\Phi}^{cp} = \frac{C_{\Phi}^{(i)}}{q^{(i)}}; \quad (10)$$

– средняя заработная плата ИТР  $Z^{cp}$  [руб.], выражаемая формулой, полученной на основе теории размерностей ( $\pi$ -теорема)

$$Z^{cp} = \eta \frac{P^{cp} C_{\Phi}^{cp}}{12}, \quad (11)$$

где  $\eta$  — коэффициент согласования, который определяется по данным за  $T_0$  год, при  $Z_0^{cp}$ ,  $P_0^{cp}$ ,  $C_{\Phi 0}^{cp}$ .

В целях верификации предлагаемого подхода к оценке значений двухпараметрического вектора "сроки—численность ИТР" рассмотрим вариант его использования на примере реализованной в проектной организации машиностроительного профиля широкомасштабной ОКР.

Исходными данными для проведения расчета являются: трудоемкость  $s_i$ -стадии ОКР  $\tilde{w}^{(i)} = 600$  [чел. мес.],  $\alpha^{(i)} = 0,4$  (т. е. 40 % работ будут выполнять последовательно). Результаты оценки сроков выполнения ОКР в зависимости от численности задействованных ИТР представлены на рис. 3.

На рис. 3, представлены три графика:  $\tilde{\tau}_1^{(i)}$  — зависимость "сроки—численность ИТР", рассчитанная по формуле (2);  $\tilde{\tau}_2^{(i)}$  — зависимость "сроки—численность ИТР", рассчитанная по формуле (4);  $\tilde{\tau}_3^{(i)}$  — зависимость "сроки—численность ИТР", рассчитанная по формуле (5).

Как видно из рис. 3, при привлечении к выполнению широкомасштабной ОКР коллектива

численностью более 150 ИТР, время разработки будет превышать традиционную оценку времени по принятым в проектных организациях подходам (см. формулу (2)). Точке пересечения графиков  $\tilde{\tau}_1^{(i)}$  и  $\tilde{\tau}_3^{(i)}$  соответствует численность коллектива ИТР  $a_{\Sigma}^{(i)} = 147$  человек.

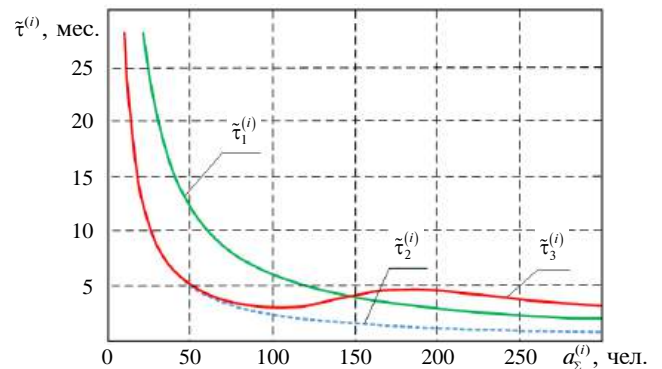


Рис. 3 Зависимость "сроки — численность ИТР" для рассматриваемой ОКР

На рис. 4 приставлена производная от зависимостей, приведенных на рис. 3.

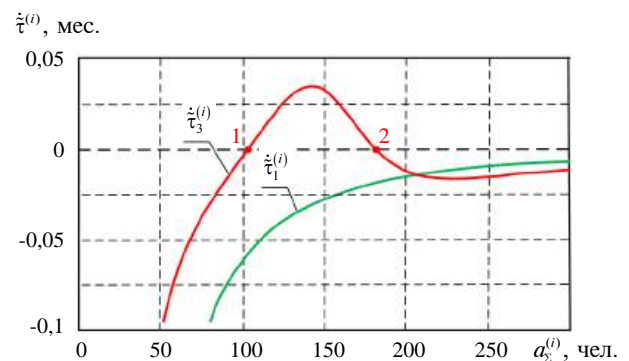


Рис. 4 Дифференциальная форма зависимости "сроки—численность ИТР"

Как видно из рис. 4, интервал (1, 2) функции  $\dot{\tau}_1^{(i)}$  соответствует околоэкстремальной области, позволяющей оптимизировать процесс планирования и организации ОКР, опираясь на закономерности выполнения творческих работ коллективом исполнителей. Выявленные закономерности свидетельствуют, что увеличение численности исполнителей более некоторого значения приводит к снижению интегральных характеристик эффективности выполнения проектных работ.

Рассмотрим зависимость минимальной плановой себестоимости ОКР от сроков ее выпол-

нения. Пусть нормативная трудоемкость выпуска документации на  $s_i$  стадии проектирования  $\tilde{w}_{\xi}^{(i)}$  не зависит от рассматриваемых ранее эффектов (см. рис. 1 и 2), связанных с изменением производительности труда ИТР в зависимости от их численности  $\tilde{a}_{\Sigma}^{(i)}$ . Расчет себестоимости  $C_{\text{ср}}^{(i)}$  проведем по формуле (8). При этом примем среднюю себестоимость человеко-месяца  $c_{\text{чм}}^{(\xi)} = 77957$  руб., а накладные расходы будут включать в себя общехозяйственные (72,7 %) и общепроизводственные (33,7 %), т. е.  $k_{\text{нр}}^{(\xi)} = 1,064$ . В соответствии с [22] используем коэффициенты-дефляторы  $\text{def}_{2022} = 1,043$  и  $\text{def}_{2023} = 1,04$ .

Введем допущение, что затраты на командировочные расходы, материалы и пр. отсутствуют. Результаты расчета при начале выполнения ОКР с января 2021 г. и с апреля 2021 г. представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, при расчете себестоимости ОКР  $C_{\text{ср}}^{(i)}$ , выполняемой коллективом из 20 человек, при нормативной трудоемкости  $\tilde{w}_{\xi}^{(i)}$ , задержка начала работ на квартал может привести к увеличению затрат до 1,15 %.

Рассмотрим теперь тот же расчет, но с учетом результативной трудоемкости  $\tilde{w}_{\text{рез}}^{(i)}$ , рассчитанной по формуле (7). Результаты расчета представлены на рис. 6.

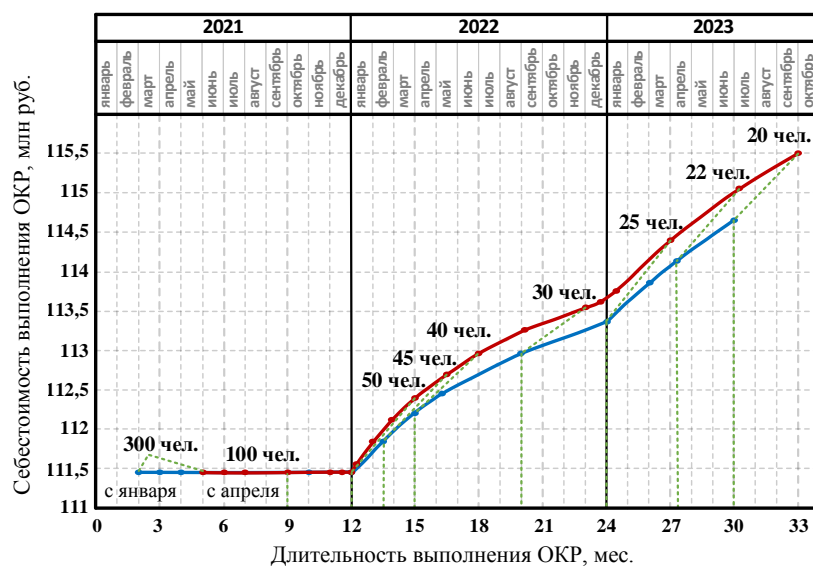


Рис. 5. Зависимость "сроки—себестоимость" при нормативной трудоемкости ОКР

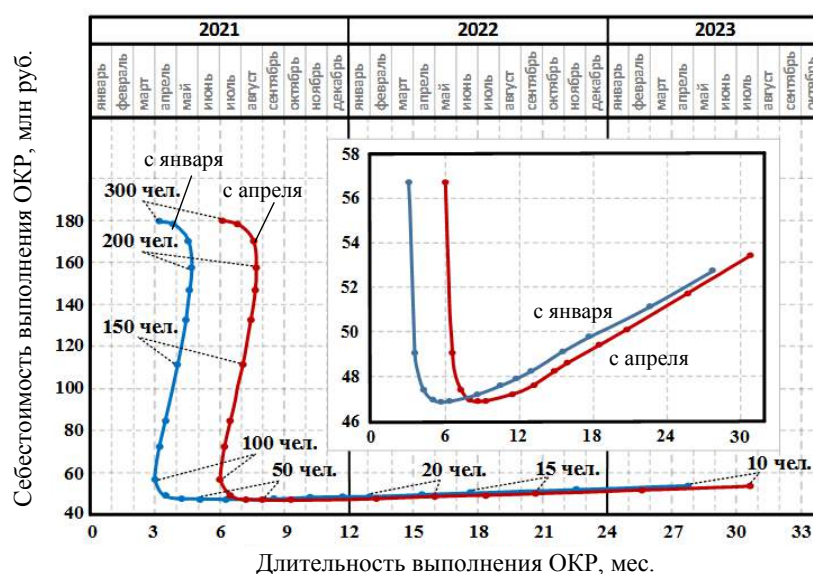


Рис. 6. Зависимость "сроки—себестоимость" при результативной трудоемкости ОКР



Анализ рис. 5 и 6 позволяет заключить, что при рациональном планировании ОКР трудоемкость разработки конструкторской документации возможно сократить до 60 %.

### Заключение

Результаты представленного исследования являются вкладом авторов в развитие методического обеспечения процессов прогнозного оценивания основных показателей ОКР. Предложен подход, позволяющий оперативно оценить значения двухпараметрического вектора "сроки—стоимость", описывающего планируемую ОКР в условиях множественной априорной неопределенности как сложности предстоящей к решению технической задачи, так и совокупности внешних и внутренних условий ее решения. Необходимо подчеркнуть, что предложенное решение является частным, пригодным в первую очередь для проектных организаций машиностроительного профиля. При этом предложенный подход имеет перспективу применения в более широком классе задач при условии набора достаточного объема статистических данных, характеризующих исследуемую область практической деятельности, их обобщения и научно обоснованного подбора вида и параметров функций, пригодных для формирования экспресс-оценок важных для принятия решения величин в условиях информационного дефицита.

Такой подход целесообразно позиционировать как элемент пространства методов планирования, программирования и управления, распо-

ложенный в приграничной области, вплотную примыкающей к пространству экспертно-интуитивных приемов с элементами искусства.

Рассмотренная в статье постановка задачи обусловлена существенным изменением обстоятельств и условий формирования портфеля заказов предприятий ОПК, сформировавшимся под влиянием целого ряда факторов, включающих государственные планы по изменению распределения усилий предприятий ОПК в направлениях производства продукции военного, гражданского и двойного назначения, а также текущими событиями глобального характера.

Предложенный подход является синергетическим и органично сочетает в себе традиционные парадигмы теории управления и организации производства с современными подходами и моделями, получившими развитие в научной области информационных технологий в многопроцессорных системах.

Приведенный пример призван способствовать формированию более глубокого понимания представленного методического инструментария для использования на практике. Сложность формирования значений оригинальных коэффициентов при использовании предлагаемого математического аппарата компенсируется возможностью создания компактного специализированного программного обеспечения или приложения для мобильного устройства, в том числе многопользовательского, позволяющего в интерактивном режиме оперативно оценивать перспективы участия предприятия в тендере на выполнение ОКР в условиях недостатка времени и исходных данных.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Клубуков И. Д., Яковец А. В., Алёхин М. Д. Организация системного проектирования и технической поддержки оборонных исследовательских программ DARPA // Инновации. 2017. № 5(223). С. 12—19.
2. Солнцев О. Г., Хромов М. Ю., Волков Р. Г. Институты развития: Анализ и оценка мирового опыта // Проблемы прогнозирования. 2009. № 2(113). С. 3—29.
3. Федеральный закон "О государственном оборонном заказе" от 29.12.2012 № 275-ФЗ (с изменениями на 25.02.2022) // Официальный портал "Кодекс" [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902389615> (дата обращения: 29.05.2022).
4. Временные методические рекомендации по определению стартовой стоимости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при проведении конкурсных торгов на выполнение НИОКР 2002 (Введены в действие распоряжением Минтранса России от 30.01.2003 № ОС-39-р) [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/44/44494/index.htm#i38646>.
5. Калошина М. Н., Ермакова О. В. Основные подходы к определению стоимости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в аэрокосмической отрасли // Электронный журнал "Труды МАИ". 2014. Вып. № 76. [Электронный ресурс]. URL: <http://trudymai.ru/upload/iblock/d3b/d3b527ac756eb481fc448f0c531227cb.pdf?lang=ru&issue=76>.



6. Павлова Е. А., Муратова Л. И. Современные методические подходы к оценке затрат на проведение НИОКР // *Фундаментальные исследования*. 2018. № 7. С. 142—146. [Электронный ресурс]. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42220>.
7. Джабраилов Шамхал Азад оглы. Подходы и современные методы оценки стоимости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ: Автореф. ... дисс. канд. эконом. наук. (08.00.10) — М., 2011. — 24 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://elibr.ru/avtoreferat/djabrailov.pdf/download/djabrailov.pdf>.
8. Приказ ФАС России от 26.08.2019 №1138/19 "Об утверждении форм документов, предусмотренных Положением о государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 2 декабря 2017 года № 1465".
9. Ерошин С. Е., Щеглов Д. К. Методика разработки концепции цифровой трансформации организации оборонно-промышленного комплекса // *Инновации и инвестиции*. 2022. № 1(223). С. 214—223.
10. Юзвович Л. И., Исакова Н. Ю., Истомина Ю. В. и др. Система государственных закупок: теоретический и практический аспекты: монография / под ред. Юзвович Л. И., Исаковой Н. Ю. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 233 с.
11. Послание Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации от 01.12.2016 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41550> (дата обращения: 16.01.2022).
12. ГОСТ 2.103-2013 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115351>.
13. ГОСТ 2.102-68 Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200001989>.
14. ГОСТ Р ИСО 15704-2008 Промышленные автоматизированные системы. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200075092>.
15. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремлённых систем. — М.: АСТ, 2006. — 504 с.
16. Amdahl G. M. Validity of the single-processor approach to achieving large scale computing capabilities. In AFIPS Conference Proceedings vol. 30 (Atlantic City, N.J., Apr. 18–20). AFIPS Press, Reston, Va., 1967. P. 483—485.
17. Gustafson J. L. Reevaluating Amdahl's law Communications of the ACM. May 1988. V. 31. Is. 5. P. 532—533. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20170809122232/https://impact.asu.edu/~mcn/cse520fa08/AmdahlsLawRevisted.pdf>.
18. Цилькер Б. Я. Организация ЭВМ и систем: учебник для вузов / С.А. Орлов, Б.Я. Цилькер. — СПб.: Питер, 2011. — 688 с.
19. Комаров В. А., Кременецкая М. Е., Соллогуб А. В., Филатов А. Н. Модели оценки ускорения проектно-конструкторских работ в наукоёмком машиностроении за счёт распараллеливания итерационных процессов разработки // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2010. № 4(24). С. 224—231.
20. Кульгин А. В. Повышение эффективности работы сотрудников банка на основе эффекта Рингельмана: мат. XI междунар. науч.-практ. конф. "Россия и Европа: Связь культуры и экономики". Ч. 2. 2015. С. 161—162.
21. Kravitz D. A., Martin B. Ringelmann rediscovered: The original article. // *J. Personality and Social Psychology*. 1986. № 50(5). P. 936—941. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.50.5.936>.
22. Приказ Минэкономразвития России от 01.04.2020 г. № 190 "Об утверждении Порядка применения индексов цен и индексов-дефляторов по видам экономической деятельности, а также иных показателей в составе прогноза социально-экономического развития Российской Федерации при формировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу" (Зарегистрирован 02.06.2020 № 58555).
23. Воробьев А. М., Громов Д. Ю., Макавеев А. Т., Федоров Ю. А., Щеглов Д. К. Методика оценки основных экономических показателей проектно-конструкторского труда сотрудников проектно-конструкторского предприятия при реализации программы САПР: сб. Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. — М.: НТИЦ "Информтехника". 2006. С. 134—138.

## **FORMALIZED APPROACH TO FORECASTING THE TIME AND COST OF THE DEVELOPMENT OF MILITARY TECHNICAL SYSTEMS**

*D. K. Shcheglov*

JSC "Konstruktorskoe byuro specialnogo mashinostroeniya", St. Petersburg, Russia  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Baltic  
State Technical University "VOENMECH" named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia

*A. G. Saybel*

JSC "North-West regional center of Concern VKO "Almaz—Antey" — Obukhovsky zavod",  
St. Petersburg, Russia

*A formalized approach to the formation of a predictive estimate of the timing and cost of developing military-technical systems based on the method of analogies and prototypes is described. A feature of the approach is the ability to determine the balance between the required number of engineering and technical workers and the acceptable time for system development.*

*Keywords:* forecasting, approach, development, terms, cost, military-technical system, analogy method, prototype.

Bibliography — 23 references.

*Received August 17, 2022*

УДК 629.7  
DOI: 10.52190/1729-6552\_2022\_3\_45  
EDN: UQGDCB

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ МИРОВОГО АВИАСТРОЕНИЯ В СФЕРЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИИ (Обзор)

А. И. Коновалова, канд. эконом. наук  
ПАО «Туполев», Москва, Россия

*Рассмотрены новые тренды мирового авиастроения в разрезе современных технологий в сфере экологии.*

*Ключевые слова:* экология, электрический самолет, водородное топливо, водородные силовые установки, нулевой выброс CO<sub>2</sub>, CityAirbus NextGen, eVTOL, GKN Aerospace, ZeroAvia.

Ожидается, что в ближайшем будущем определяющим фактором в мировом авиастроении будет играть вопрос экологии. Используемые в настоящее время технологии будут обременены новым налогом, называемым "карбоновый сбор". Основные ожидания производителей и эксплуатантов связаны с переходом от углеродного топлива к электрическим и водородным технологиям.

### Углеродный налог на авиационное топливо

В Филтоне (Великобритания) создан новый глобальный технологический центр GKN Aerospace, который предоставляет возможности сотрудничества по сокращению углеродных выбросов в авиации [1]. Компания GKN использует новый комплекс GTC в качестве центра инноваций для технологий, направленных на сокращение выбросов углекислого газа в аэрокосмической отрасли (рис. 1). Работа включает в себя программу Airbus "Крыло завтрашнего дня" и проект H2Gear по разработке новой водородно-электрической силовой установки. Как у компании Airbus, так и у компании Rolls-Royce имеются большие заводы недалеко от площадки в Филтоне рядом с Бристолем.

По словам экспертов, авиационной отрасли необходимо приложить больше усилий, чтобы достичь ключевой цели — нулевых выбросов углерода к 2050 г. Стивен Фитцпатрик, основатель и генеральный директор компании Vertical Aerospace, являющейся разработчиком электри-

ческих ЛА с вертикальным взлетом и посадкой (eVTOL), призвал правительства ввести углеродные налоги на коммерческое авиационное топливо, чтобы побудить отрасль отказаться от зависимости от ископаемых видов топлива [2].



Рис. 1. Технологический центр GKN Aerospace, Филтон (Великобритания)

При расчёте на то, что цена на топливо Jet-A должна составлять около 50 или 60 долл. за тонну, простой налог на выбросы углерода является лучшим способом поддержки такого уровня.

Отсутствие налогов на топливо в коммерческой авиации искажает эксплуатационные расходы и подрывает усилия, направленные на то, чтобы убедить эксплуатантов самолетов оборудовать свой флот новыми электрическими и водородными силовыми установками, чтобы достичь изначальную цель и сократить выбросы на 10 % к 2030 г.

По оценкам Airbus, компания не может решить эту амбициозную задачу самостоятельно, в связи с чем аэрокосмическая экосистема вокруг Филтона жизненно важна для достижения этих

Коновалова Анастасия Игоревна, ведущий специалист.  
E-mail: akonovalova@tupolev.ru

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2022 г.

© Коновалова А. И., 2022

целей. В новом центре GTC планируют разместить около 300 сотрудников компании и ее партнеров, занятых в сфере прорывных экологических технологий. В центр будут поступать ежегодные инвестиции на исследования и разработки в размере около 30 млн фунтов стерлингов.

Специалисты Rolls-Royce отмечают, что сокращение выбросов углерода от коммерческих полетов будет в значительной степени зависеть от наличия экологичного авиационного топлива (SAF).

Переход на экологичное авиационное топливо не будет дешевым: новое топливо может стоить в 2–5 раз дороже, чем Jet-A. Рынок, в свою очередь, должен стимулироваться регулированием, предписаниями по смешиванию или субсидиями от источника.

Новый комплекс GTC в Филтоне потребовал первоначальных вложений в размере 32 млн фунтов стерлингов (44 млн долл. США), почти половину из которых правительство Великобритании покрыло через свой Институт аэрокосмических технологий. В июле предприятие поставило первый комплект крыльев, оперения и электропроводки для полностью электрического самолета Alice от Eviation, который, как ожидается, совершит свой первый полет в декабре. GKN также сотрудничает с разработчиками самолетов eVTOL — компаниями Vertical Aerospace и Joby Aviation.

Часть усилий по обезуглероживанию включает в себя повышение экологичности производственного процесса. "Крыло завтрашнего дня" фирмы Airbus потребует, как минимум на 60 % меньше энергии для производства и на 20 % сократит количество отходов.

#### **Дополнительные обязательства по водороду ZeroAvia**

Группа по управлению активами Rose Cay Partners (Делавэр, США) и ирландский грузовой авиаперевозчик ASL планируют перевести региональные авиалайнеры на водородные двигатели в партнерстве с ZeroAvia (США). [3] Планы ZeroAvia по замене двойных турбовинтовых двигателей, работающих на топливе Jet A, на водородно-электрическую силовую установку были озвучены калифорнийским стартапом в ходе заявлений, приуроченных к конференции ООН по изменению климата COP26 в Шотландии.

Компания Rose Cay заявила, что намерена приобрести до 250 подержанных самолетов для перевода их на водородную энергию и для последующей сдачи в аренду операторам. Компа-

ния не уточнила, какие типы самолетов она будет выводить на рынок, но заявленная цель компании по осуществлению первых поставок в 2024 г. совпадает с планами ZeroAvia по вводу в коммерческую эксплуатацию 19-местных конструкций, таких, как Dornier 228. Rose Cay намерена участвовать в развертывании водородной инфраструктуры в аэропортах по всему миру (рис. 2).



*Рис. 2. Самолет ATR*

ASL Aviation планирует переоборудовать 10 своих грузовых самолетов ATR 72 водородными двигателями в рамках партнерства с ZeroAvia. Двухдвигательный турбовинтовой самолет, вмещающий 72 человека в пассажирской конфигурации, будет самой большой моделью, участвующей в процессе переоборудования ZeroAvia (рис. 3).



*Рис. 3 ATR 72 Cargo Aircraft*

ASL Airlines Ireland предоставит ZeroAvia списанный самолет ATR 72, который будет использован для опытно-конструкторских работ на силовой установке ZA2000 мощностью от 2 до 5 МВт. Компания предварительно согласилась переоборудовать 10 находящихся в эксплуатации самолетов, которые она хотела бы ввести в коммерческую эксплуатацию к 2026 г.

В рамках программы HyFlyer II, поддерживаемой правительством Великобритании, ZeroAvia разрабатывает экосистему водородной заправки в аэропорту в партнерстве с Европейским центром морской энергии, который производит экологически чистый водород с использованием энергии ветра и приливов на своей базе на Оркнейских островах в Шотландии. [4]

Разработчик водородных силовых установок Universal Hydrogen также работает над планами по переоборудованию двухдвигательных турбовинтовых самолетов ATR 72 и Dash 8. Компания привлекла дополнительные 62 млн долл. для финансирования своих работ по вводу модернизированных самолетов в коммерческую эксплуатацию к 2025 г., и она рассчитывает начать испытательные полеты 40-местного опытного образца ATR 42 в 2022 г. [5].

Индийская компания Hindustan Aeronautics Ltd. (HAL) подписала с ZeroAvia меморандум о взаимопонимании в поддержке усилий по получению дополнительного сертификата типа (STC) для перевода 19-местного двухдвигательного турбовинтового самолета Dornier 228 на водородный двигатель [6].

#### **Планы Airbus построить авиалайнер с нулевым уровнем выбросов**

В Airbus рассматривают несколько возможностей для будущих самолетов, предназначенных для достижения целей углеродной нейтральности авиации, включая авиалайнеры с водородным двигателем, для которых потребуется сотрудничество с регулирующими органами, производителями энергии и строителями инфраструктуры (рис. 4, 5).

По словам генерального директора Гийома Фори, Airbus по-прежнему планирует ввод в эксплуатацию авиалайнеров с водородным двигателем в 2035 г.



*Рис. 4 Перспективные проекты самолетов Airbus*



*Рис. 5 Проект самолета Airbus с нулевым выбросом CO<sub>2</sub>*

Авиация медленно реагирует на вопросы изменения климата. Пандемия не ослабила общественного или законодательного давления по вопросу ограничения выбросов в некоторых регионах оно даже усилилось, особенно в Европе. Экологическая устойчивость сейчас стоит на первом месте в повестке дня отрасли.

Airbus изучает различные технологии и направления как, например, создание авиалайнера с водородным двигателем или разработка крыла, которое сможет адаптировать свою форму, размах и поверхность во время полета. Другие связаны с усовершенствованием существующих технологий, а третьи представляют собой функции, возникающие в результате сегодняшней экономики замкнутого цикла, например, ковры, полностью изготовленные из переработанных отходов. Такой материал уже присутствует на самолете A350-900 Airspace Explorer (рис. 6), специально сконфигурированной летающей лаборатории A350 для демонстрации новых технологий салона, и этот материал прошел все нормативные испытания для использования на коммерческих авиалайнерах.



*Рис. 6 A350-900 Airspace Explorer*



Европейская аэрокосмическая группа продолжает работу над концепцией авиалайнеров с водородным двигателем. Ввод их в коммерческую эксплуатацию ожидается в намеченные ранее сроки, позволяющие достичь ранее заявленной цели 2035 г.

### **Сотрудничество Airbus в сфере поставок водорода**

Чтобы подготовиться к использованию водорода в аэропортах, компания Airbus заключила несколько соглашений о сотрудничестве, в основном в Европе [7]. Airbus работает совместно с французской компанией Air Liquide, занимающейся решениями и технологиями в области промышленных газов, и оператором аэропортов Vinci Airports, чтобы проанализировать возможность оснащения европейской сети Vinci из 25 аэропортов оборудованием для производства, хранения и снабжения водородом, необходимым для использования на земле и на самолете. Французский аэропорт Лион-Сент-Экзюпери станет пилотной площадкой для проекта и в 2023 г. получит станцию распределения газообразного водорода для снабжения наземных транспортных средств как аэропорта, так и его партнеров. На этом первом этапе будут проверены возможности и динамика аэропорта в качестве "водородного узла". Air Liquide и Airbus уже сотрудничают по космической программе Ariane и разделяют ответственность за баки с запасом жидкого водорода и кислорода ракет-носителей от проектирования до сборки.

Airbus также подписала соглашения с тремя авиакомпаниями — европейским бюджетным перевозчиком EasyJet, скандинавскими авиакомпаниями SAS и новозеландской Air New Zealand — для изучения потребностей в инфраструктуре для будущих самолетов с водородным двигателем.

В рамках проекта под названием Zero E ("нулевые выбросы") в сентябре 2020 г. Airbus представила три концепции возможных авиалайнеров с водородным двигателем. Компания рассчитывает принять решение о наиболее подходящей водородной технологической платформе в 2024 или 2025 г. Однако, по словам вице-президента Airbus по программе самолета с нулевыми выбросами концепция Airbus, показывающая планер со смешанным крылом, получила наибольшее общественное освещение, но имеет меньше всего шансов материализоваться.

Все модели Airbus сертифицированы для полетов с топливной смесью 50/50, а к 2030 г. производитель планирует получить 100-процентную сертификацию с экологичным авиаци-

онным топливом. Испытательный полет самолета A350, работавшего на 100 %-ном экологичном авиационном топливе, в 2022 г. оказался успешным, и Airbus планирует произвести аналогичный испытательный полет самолета A320neo в сотрудничестве с CFM International, производителем двигателей Leap-1A, которые используются для семейства самолетов A320neo, в конце 2022 г. или в начале 2023 г. Но увеличение объема экологичного авиационного топлива, используемого авиакомпаниями во всем мире, составляет менее 1% от их общего потребления топлива. По данным Группы действий в области воздушного транспорта (ATAG), эксплуатанты подписали обязательства по закупке экологичного авиационного топлива в общем объеме 6,3 млрд л во время пандемии [8].



*Рис. 7 Проект самолета CityAirbus NextGen*

В настоящее время Airbus фокусируется на технологии электрификации для своего городского ЛА CityAirbus NextGen. Производитель представил проект электрического ЛА с вертикальным взлетом и посадкой (e-VTOL) с неподвижным крылом, V-образным хвостовым оперением и восемью комплектами электродвигателей и воздушных винтов на саммите по устойчивому развитию в Тулузе. Городской ЛА следующего поколения CityAirbus NextGen представляет собой смесь элементов двух бывших демонстрационных образцов e-VTOL, Vahana и CityAirbus. Полностью электрический ЛА CityAirbus NextGen будет перевозить до четырех пассажиров на расстояние до 80 км (50 миль) со скоростью 120 км/ч (75 миль в час) [9].

Тем не менее, даже если авиалайнер Airbus с водородным двигателем поднимется в небо в 2035 г., на первом этапе он будет применяться только для региональных и ближнемагистральных рейсов.

### Заключение

В будущем ожидается, что около 14 % нулевых выбросов будет приходиться на прорывные технологии, включая электрические самолеты, но экологичное авиационное топливо окажет большее влияние и будет составлять львиную долю прогресса к 2050 г., по сравнению с более эффективными двигателями.

На водород делаются большие ставки в долгосрочной перспективе, но это потребует радикального изменения конструкции самолета как в аэродинамическом плане, так и в двигательных установках. Это связано с тем, что водород занимает гораздо больший объем, чем керосин, и должен храниться в сверхохлажденном состоянии, существует также проблема количества энергии, необходимой для доведения водорода до указанной температуры.

Ожидается, что водородно-электрическая силовая установка ZeroAvia позволит осуществлять рентабельные региональные грузовые перевозки с использованием существующих самолетов.

Для ввода в эксплуатацию в 2035 г. авиалайнеров с водородным двигателем критически необходимо сотрудничество на всех этапах. Потребуется поддержка регулирующих органов и органов, сертифицирующих новые виды энергии и использующие их самолеты, а также необходимость сотрудничества производителей энергии и поставщиков инфраструктуры. Наличие нужного топлива в нужное время, в нужном месте и по приемлемой цене остается важным фактором.

Компании стремятся совместно создать совершенно новый рынок, который обеспечит городскую воздушную мобильность, одновременно решая экологические и социальные проблемы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. GKN Aerospace is the original aerospace innovator. [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://www.gknaerospace.com/en/about-gkn-aerospace>.
2. Founded in 2016 by Stephen Fitzpatrick to create the most advanced eVTOL in the world. Hear how we are making this a reality. [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://vertical-aerospace.com>.
3. Rose Cay Partners with ZeroAvia to Fund Hydrogen-Electric Powered Zero-Emission Aircraft. [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://finance.yahoo.com>.
4. Heynes G. ZeroAvia achieves new milestone in its HyFlyer II programme that aims to target the development of a hydrogen fuel cell powertrain. [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://www.h2-view.com>.
5. Грузовая авиакомпания модифицирует турбовинтовые ATR 72 для использования водорода. [Электронный ресурс]. Код доступа: <http://www.ato.ru/content/gruzovaya-aviakompaniya-modificiruet-turbovintovye-atr-72-dlya-ispolzovaniya-vodoroda>.
6. Hindustan Aeronautics Ltd (HAL) Collaborating with ZeroAvia to Develop Hydrogen Powertrain for Dornier 228 Zero-Emission Aircraft. [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://www.zeroavia.com/hal>.
7. Airbus, Air Liquide and VINCI Airports Announce a Partnership to Promote the Use of Hydrogen and Accelerate the Decarbonization of the Aviation Sector. [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://www.yahoo.com/lifestyle/airbus-air-liquide-vinci-airports-064500480.html>.
8. Aviation: Benefits Beyond Borders. [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://aviationbenefits.org/downloads/aviation-benefits-beyond-borders-2020>.
9. CityAirbus NextGen is an all-electric, four-seat vertical take-off and landing (eVTOL) multicopter concept featuring a wing. [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/cityairbus-nextgen>.

## TECHNOLOGICAL AND ECOLOGICAL TRENDS IN GLOBAL AIRCRAFT INDUSTRY (Review)

A. I. Konovalova

PJSC "Tupolev", Moscow, Russia

*The article discusses new trends in the global aircraft industry in the context of modern technologies in the field of ecology.*

**Keywords:** ecology, electric aircraft, hydrogen fuel, hydrogen power plants, zero CO<sub>2</sub> emission, CityAirbus NextGen, eVTOL, GKN Aerospace, ZeroAvia.

Bibliography — 9 references.

Received April 5, 2022

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России: Межотр. науч.-техн. журнал / Федеральное государственное унитарное предприятие «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2022. Вып. 3. С. 1—52.

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

Подписано в печать 20.09.2022.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,2.

Тираж 250 экз. Заказ 2001.

Свободная цена.

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано: 101000, Москва,

Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.

ИП Кириченко Алексей Викторович.

Индекс 79379.



# Правила для авторов по оформлению рукописей статей, предлагаемых к публикации в журналах

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной и электронной версиях журнала в сети Интернет. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в том числе "авторское право"). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

## Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи .....,  
предоставляем редколлегии журнала и издателю ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»  
.....  
(название журнала)

безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: ..... (ф.и.о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», Редакция журнала. Дополнительная информация может быть получена в редакции при обращении по телефону: 8 (495) 491-43-17 или по E-mail: izdanie@ntckompas.ru.

Каждая статья рецензируется в соответствии с решением редколлегии журнала. Рецензенты выбирают из числа ученых и специалистов, компетентных в вопросах, рассматриваемых в статье, и имеющих собственные публикации в данном направлении. Решение о порядке публикации статьи принимается редколлгией с учетом мнения рецензентов. В случае разногласий среди членов редколлегии окончательное решение принимает главный редактор. При полном отклонении рукописи статьи от публикации редакция журнала направляет авторам мотивированный отказ. По этому факту редакция не вступает в полемику с авторами.

### Комплектование статьи (обзора)

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

- сопроводительное письмо, подписанное руководством организации;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати и распространения в Российской Федерации и других государствах. При отсутствии в организации экспертной комиссии вме-

сто экспертного заключения может быть представлено соответствующее заявление на имя главного редактора журнала от имени руководства организации, где работают авторы. В экспертном заключении или заявлении в обязательном порядке должна быть отражена возможность открытой публикации и передачи публикуемых материалов за границу.

- лицензионный договор по приведенному образцу;

- рукопись статьи — объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — 20 страниц. Рекомендуемая гарнитура — New Times Roman. Размер шрифта — 12;

- Материал статьи представляется в редакцию в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте с текстом в формате Word на электронную почту.

### Оформление статьи:

- статья начинается с указания УДК;
- название статьи набирается строчными буквами (кроме начальной прописной) полужирным шрифтом, размер шрифта 14, для остального текста используется простой шрифт размером 12, причем рекомендуемая гарнитура шрифта — Times New Roman;
- после названия — список авторов, инициалы авторов предшествуют их фамилиям;

- далее представляется аннотация статьи (10—15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);

- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);

- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литерных обозначений (типа 1а, 2б и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи;

- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, почтовый адрес предприятия, телефон, E-mail;

- основной текст статьи должен начинаться с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

- после основного текста — список использованных источников "Литература" (не менее 5 источников); Список использованной литературы должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1—6], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (1), уравнение (4), (рис. 3), (табл. 2). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются;

- далее размещается подробная англоязычная информация о статье: название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, аннотация, ключевые слова (Keywords).

### **Оформление рисунков:**

- рисунки и графики вставляются непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе.

- рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только в символьной (буквенной) форме, а через запятую — размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только на

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

- подписи под соответствующими рисунками (полужирный курсивный) представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию.

### **Оформление формул:**

- простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType;

- стандартные математические обозначения (например,  $\max$ ,  $\log$ ,  $\sin$ ,  $\exp$  и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам;

- для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив);

- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;

- для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы. Если индекс представляет собой сокращенную форму русского слова — характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например  $U_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вых}}$ ,  $v_{\text{гр}}$  и т. п.

- размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

### **Оформление таблиц:**

- содержание таблицы не должно дублировать данные, приводимые на графиках или в тексте;

- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

Рисунки, формулы и таблицы должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

При публикации в журнале каждая статья (в контактной информации) сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания.

Авторы (или автор) каждой статьи после выхода журнала в свет имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).