

ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС — научно-техническому прогрессу России



- МАШИНОСТРОЕНИЕ



- ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

- СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ
И ИЗМЕРЕНИЯ



4'2020



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

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



Межотраслевой научно-технический журнал

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России
(4 выпуска)

Подписной индекс **79379**

Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал

Конструкции из композиционных материалов
(4 выпуска)

Подписной индекс **80089**

Издается с 1981 года



Научно-технический журнал

Информационные технологии в проектировании и производстве
(4 выпуска)

Подписной индекс **79378**

Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал

Экология промышленного производства
(4 выпуска)

Подписной индекс **80090**

Издается с 1993 года



Научно-практический журнал

Вопросы защиты информации
(4 выпуска)

Подписной индекс **79187**

Издается с 1974 года

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

✓ включены решением ВАК Министерства 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

4 (148) ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС - научно-техническому прогрессу России

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1984 г.

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Багрецов С. А., Катюха Р. В., Евенко А. В. Последовательное проектирование организационных структур человеко-машинных комплексов..... 3

МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Лушина Е. Ю. Адаптивная методика прогнозирования остаточного ресурса авиационного радиоэлектронного оборудования 8

Волохин В. А., Гракович И. В., Кузнецов Н. П. Параметрические колебания в инженерном деле и проблемы их моделирования (Часть 2)..... 12

Спирягин В. В., Чмыхало А. И. Исследование механических характеристик образца из сплава вуда с применением численного моделирования методом конечных элементов..... 23

ИЗМЕРЕНИЯ. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Афонин Е. Г. Составы для электроосаждения вольфрамовых покрытий из расплавленных солей и водных растворов (Обзор) 28

Шовкалюк А. П. Способ выбора комплектующих систем космических аппаратов..... 37

Потоцкая А. М. Подход к решению проблемы повреждения авиационных газотурбинных двигателей посторонними предметами 42

Кабаков В. В. Технология волоконно-оптических датчиков при испытаниях в гиперзвуковой аэродинамической трубе..... 46

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

Ле Ань Ту, Жиленков А. А. Анализ частотно-временных сигналов при диагностике неисправностей оборудования 50

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Вологина М. М. Практика поддержания действия патентов на изобретения и полезные модели, правообладателем которых является Российская Федерация 54

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Ответственный секретарь — К. В. Трыкина,

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

УДК 001.891.57

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ КОМПЛЕКСОВ

С. А. Багрецов, д-р техн. наук, д-р эконом. наук; Р. В. Катюха, канд. техн. наук
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

А. В. Евенко

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

Рассмотрена методология последовательного проектирования организационных структур систем управления (ОС СУ) человеко-машинных комплексов, определяющая необходимость наличия иерархически взаимосвязанных, постепенно усложняющихся за счет расширения числа учитываемых факторов моделей функционирования ОС СУ, обеспечивающих сужение композиции нормальных функций выбора вариантов ОС СУ, определяемых совокупностью бинарных отношений. Задача проектирования рассмотрена как многокритериальная краевая задача многошагового дискретного управляемого процесса.

Ключевые слова: проектирование, организационная структура, нечеткость, бинарные отношения, многокритериальная скаляризация, транзитивное замыкание, отношения Парето.

Специфической особенностью задач проектирования организационных структур современных систем управления (СУ) является их высокая размерность, которая практически исключает возможность применения полного перебора проектных решений и определяет необходимость поиска путей сокращения анализа альтернатив в задачах проектирования ОС. В этом плане актуальным может быть применение идей последовательного анализа альтернатив проектных решений, использующих специфику решаемых системой задач [1, 2].

Пусть варианты конструктивных решений (альтернатив) организации оргструктуры систем управления описываются набором (вектором) параметров $S_n \in E^{N_n}$ размерности N_n , принимающим значения из множества S_n^0 . Параметры S_n будем называть проектными или конструктивными в случае, когда они детально описывают оргструктуру на стадии ее проектирования.

Используя модели функционирования организационных структур, можно провести анализ поведения альтернативных вариантов организации оргструктуры во времени и во внешней среде. Сравнение результатов функционирования для всевозможных пар альтернатив из S_n^0 определяется на множестве S_n^0 бинарное отношение сравнительной эффективности вариантов организации систем управления: альтернатива S_{nx} эффективнее альтернативы S_{ny} тогда и только тогда, когда $(S_{nx}, S_{ny}) \in \Phi$ или $(S_{nx} \Phi S_{ny})$ — бинарное отношение.

В зависимости от свойств модели (S_n, Φ) приемлемыми могут оказаться следующие решения: множество всех мажорант модели (S_n, Φ) , ядро ее смешанного расширения, ядро модели (S_n, Φ^T) , где Φ^T — транзитивное замыкание отношения Φ , и т. д. Наиболее общей постановкой задачи проектирования организационных структур систем управления является

$$S_n \rightarrow S_n^* = C(S_n),$$

где $C(\dots)$ — некоторая функция выбора.

Так как любая функция выбора может быть представлена в конечном счете в виде композиции нормальных функций выбора, она в полной мере определяется совокупностью бинарных отношений на множестве S_n . Таким образом, язык бинарных отношений является наиболее приемлемым для решения задач проектирования. То-

Багрецов Сергей Алексеевич, профессор.

E-mail: sergeibagrecov@bk.ru

Катюха Роман Васильевич, преподаватель.

E-mail: romankatyuha@mail.ru

Евенко Александр Валериевич, заместитель начальника кафедры.

E-mail: alex.question@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 1 октября 2020 г.

© Багрецов С. А., Катюха Р. В., Евенко А. В., 2020

гда под задачей проектирования оргструктур будем понимать задачу выделения ядра — множества максимальных элементов из S_n^0 по бинарному отношению Φ :

$$S_n^0 \rightarrow S_n^* = \max(S_n, \Phi), \quad (1)$$

где Φ в общем случае имеет нечеткий характер.

Наличие нечеткости отношений предпочтения альтернатив связано со сложностью объекта проектирования с невозможностью в ряде случаев полной централизации всех процессов сбора и обработки информации и принятия решений. Это определяет необходимость декомпозиции оргструктур систем управления и этапную декомпозицию процесса проектирования.

Каждому этапу проектирования сопоставляют свою модель функционирования ОС СУ, а постоянное поэтапное усложнение задачи связано с расширением состава учитываемых в моделях параметров и их взаимосвязей. В итоге процесс проектирования приобретает иерархический характер.

Тогда суть последовательного анализа проектных решений ОС СУ может быть сведена к применению на каждой j -й итерации метода некоторого "правила отбраковки" альтернатив организации ОС СУ, определяемого содержанием решаемой задачи, т. е.

$$S_{nj-1} \rightarrow S_{nj} = S_{nj-1} \setminus \Omega_j,$$

где Ω_j — множество альтернатив организации СУ, отбракованных на j -й итерации проектирования организационной структуры. Решением служит получаемое на выходе, т. е. на k_n -м шаге процедуры, множество вариантов S_{nk} проектных решений ОС СУ. К правилам их отбраковки предъявляют два требования: во-первых, правила отбраковки проектных решений должны быть согласованы с отношением Φ эффективности работы оргструктуры СУ с тем, чтобы множество S_{nk} должным образом аппроксимировало искомое ядро решения задачи S_n^* , т. е. ($S_{nk} \supseteq S_n^*$); во-вторых, правила отбраковки должны реализовываться "быстрыми", "упрощенными" алгоритмами.

Пусть V_j , $j = \overline{1, K_n}$, — заданные бинарные отношения на S_n^0 . Предположим, что $W_j = V_j^t$, когда $\Phi = \Phi^t$ и $W_j = V_j$, если $\Phi \neq \Phi^t$, где V_j^t — транзитивное замыкание отношения V_j .

Введем отношение $W = \bigcup_{j=1}^{K_n} W_j$. Рассмотрим сле-

дующую схему последовательного анализа вариантов оргструктуры

$$S_{nj-1} \rightarrow S_{nj} = \max(S_{nj-1}, W_j), \quad j = \overline{1, K_n}, \quad (2)$$

с начальным условием

$$S_n = S_n^0. \quad (3)$$

Задачу (2)—(3) можно рассматривать как краевую задачу для многошагового дискретного управляемого процесса проектирования организационной структуры исследуемой системы управления. В [3] определены достаточные условия, обеспечивающие общее решение краевой задачи (2)—(3) на основе доказательства следующего утверждения. Пусть $W = \Phi$. Тогда для схемы (2)—(3):

- $S_{nk} \supseteq S_n^*$, если $S_{nk} \neq \emptyset$, Φ антисимметрично;
- $S_{nk} \supseteq S_n^*$, если $S_{nk} \neq \emptyset$, Φ антисимметрично и S_n^* внешне устойчив в (S_n, Φ) ;
- $S_{nk} = S_n^*$, если Φ — порядок.

Содержание этого утверждения состоит в следующем: чтобы переход от задачи (1) к схеме последовательного анализа вариантов (2)—(3) имел смысл, требуется, чтобы отношения V_j были "проще", т. е. были реализованы на основе более простых условий, обеспечивающих применение быстродействующих алгоритмов. В то же время V_j должны быть достаточно представительными, чтобы сравнение альтернатив построения оргструктур давало информацию о сравнении по Φ . Практически это означает, что в отличие от трудно вычисляемых критериев и отношений эффективности альтернативных вариантов построения оргструктур, отражающих глобальные цели их проектирования, отношения V_j порождаются их основными характеристиками. Обычно это простые аналитические модели расчета параметров опорного варианта объекта проектирования, позволяющие "вывести" конструктивные параметры ОС в область, близкую к решению с последующей его коррекцией.

Таким образом, необходимость включения в общую систему проектирования оргструктур "быстрых" алгоритмов поиска опорных (базовых) вариантов ОС СУП наряду с алгоритмами глобальной оптимизации ОС в работе [3] получила строгое логическое подтверждение. В рамках этого же подхода может быть определено их положение в общей структуре последовательного применения технических средств проектирования.

При этом отношение Φ порождается параметрическим семейством критериев сравнительной эффективности ОС ($W(S_n)$).

Векторный характер эффективности оргструктур определяет особенности методов сравнительной оценки эффективности альтернатив $S_{ni} \in S_n^0$ организации ОС СУ. Наиболее эффективными в этом плане являются методы нечеткого дискриминантного анализа [4], игровые методы сравнительной оценки [5], оценки гомотетичности [5]. Учитывая векторный характер критериев эффективности ОС СУ, можно рассматривать три способа задания бинарных отношений Φ на S_n^0 :

$$\begin{aligned} S_{nx} \Phi_1 S_{ny} &\leftrightarrow W^l(S_{nx}) \geq W^l(S_{ny}), \quad l = \overline{1, m_n}; \\ S_{nx} \Phi_2 S_{ny} &\leftrightarrow W^l(S_{nx}) > W^l(S_{ny}), \quad l = \overline{1, m_n}; \\ S_{nx} \Phi_3 S_{ny} &\leftrightarrow W^l(S_{nx}) > W^l(S_{ny}), \quad l = \overline{1, m_n}, \\ &W(S_{nx}) \neq W(S_{ny}), \end{aligned}$$

где m_n — число частных критериев в эффективности ОС.

В работах [6–8] отношение Φ_2 определено как отношение строгого предпочтения или отношение по Слейтеру, а Φ_3 — отношением Парето.

Наиболее употребляемыми в практических приложениях проектирования объектов различной физической природы, как следует из работы [9], являются бинарные отношения Парето на конечных множествах.

Трудности описания множества S_n^0 и нечеткий характер бинарного отношения Φ в задачах сравнительной оценки эффективности работы оргструктур заставляют использовать человеко-машинные процедуры принятия решения. Опираясь на известные результаты по формированию бинарных отношений Φ векторными критериями [10] и теоремы о существовании седловых точек на множестве Φ , которые указывают на наличие во множестве S_n^0 множества эффективных точек (оптимальных по Парето), утверждение о существовании решения уравнения (1) можно получить из следующей теоремы [7]. Пусть

$$\Phi \left\{ (S_{nx}, S_{ny}) \in S_n^0 \mid W(S_{nx}) - W(S_{ny}) \geq 0, W(S_{nx}) \neq W(S_{ny}) \right\} \text{ — отношение Парето по векторному критерию } W(\dots) : S_n^0 \rightarrow E^{mn},$$

где S_n^0 — компакт в E^N ;

$W(\dots)$ — полунепрерывная сверху по S_n функция.

Тогда решение уравнения (1) существует, т. е. $S_n^* \neq \emptyset$.

Данная теорема определяет основные требования к выбору моделей функционирования ОС СУ на всех уровнях декомпозиции задачи проектирования. Сложности, связанные с выполнением этих требований, определяются моделями реального соотношения альтернатив. Наиболее общим является случай, когда бинарное отношение Φ представляет собой полный порядок [11], определяемый на множестве S_n^0 скалярной функцией $W(S_n)$ — критерием эффективности ОС СУ. Тогда задача оптимизации оргструктуры СУ будет состоять в определении

$$\arg \text{extr } W(S_n), S_n \in S_n^0,$$

где extr есть \min или \max в зависимости от вида скалярной функции.

Методы скаляризации, т. е. сведения векторного критерия $W(\dots)$ к некоторому параметрическому семейству задач скалярной оптимизации, подробно рассмотрены в [5]. В самом общем виде векторный критерий эффективности функционирования оргструктур СУ может быть представлен группами двух взаимно противоположных критериев: реальной продуктивной деятельности органов управления (вероятности своевременного и безошибочного решения задач управления) и стоимостные показатели деятельности системы управления с данной организационной структурой. В этом случае наиболее эффективным оказывается метод линейной многокритериальной скаляризации [5].

$$\text{При этом } W(S_n) = \sum_{i=1}^{m_n} \lambda_i W_i^0(S_n),$$

где λ_i — весовые коэффициенты; $0 \leq \lambda_i \leq 1$; $\sum_{i=1}^{m_n} \lambda_i = 1$; $W_i^0(S_n)$ — нормированное значение i -го частного критерия; $0 < W_i^0(S_n) \leq 1$.

Для нормирования векторов $W_i^0(S_n)$ обычно используют предельные значения составляющих вектора эффективности $W_{i\text{пред}}$, определение которых осуществляют на основе решения задач оптимизации с условными критериями предпочтения, т. е. $\text{opt}_{S_n \in S_n^0} W_j(S_n)$ при $W_j(S_n) \in \Delta W_j$;

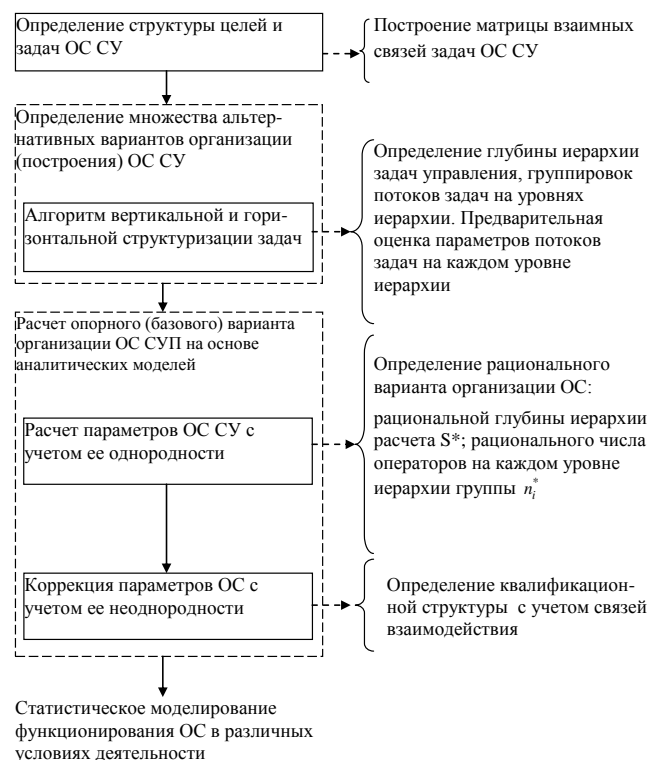
$j = \overline{1, m_n}$; $j \neq i$, где ΔW_j — область допустимых значений j -го критерия эффективности ОС.

В [5, 11] данную проблему связывают с определением области компромиссов по эффекту или затратам на организацию функционирования ОС СУП. Это приводит к сужению множества решений и необходимости ре-

шения задачи векторной оптимизации при наличии строгого противоречия между отдельными неравнозначными показателями качества.

Таким образом, задачу проектирования ОС СУ на всех этапах ее реализации следует рассматривать как многокритериальную задачу векторной оптимизации, решение которой обеспечивается последовательным сравнением альтернатив организации ОС СУ по эффективности на основе моделирования целевого применения системы. Иерархический характер процесса проектирования при этом определяет только сложность самих моделей выбора.

На рисунке приведена структурная схема последовательного проектирования ОС СУ. В ней согласование требований внешнего и внутреннего процессов проектирования системы обеспечивается процедурами генерирования вариантов организации ОС на основе автоматического формирования альтернативных вариантов вертикальной и горизонтальной структуризации задач, решаемых ОС.



Структурная схема реализации последовательного принципа процесса проектирования ОС СУ

Формирование базовой структуры ОС СУ обеспечивают последовательно применяемыми аналитическими алгоритмами расчета параметров ОС.

Дальнейшее уточнение структуры ОС СУ обеспечивают уже более сложными методами на основе аналитико-статистического моделирования с применением человеко-машинных методов принятия решений [12]. Наличие базового варианта в процессе последовательного проектирования ОС дает возможность упростить ряд зависимостей и перейти от нелинейных моделей к линейным в окрестности базового варианта организации ОС СУП.

Условия $V_j \subseteq \Phi$ в приведенной теореме не что иное, как условия аппроксимации "изнутри" отношения Φ более простыми отношениями V_j . Они гарантируют, что в методе последовательного анализа вариантов организации ОС СУ не будут отсеяны оптимальные по Φ варианты.

Включение $V_j \subseteq \Phi$ означает, что альтернатива организации ОС с лучшими характеристиками (лучшая по отношению V_j) эффективнее, т. е. лучше по глобальному отношению эффективности Φ . Равенство $W = \Phi$ отражает полноту рассматриваемых векторов эффективности СУП, т. е. более эффективная альтернатива организации ОС СУП должна обладать по крайней мере одним вектором лучших характеристик. Из выполненного анализа следует, что для реализации схемы последовательного анализа вариантов организации ОС СУП в процессе ее проектирования необходимо построить отношения V_j , согласованные с Φ .

С одной стороны, это выдвигает задачу разработки методов анализа согласованности V_j с Φ , а с другой — определяет важность этапа формирования облика оргструктур, обеспечивающего определение множества вариантов организации ОС СУ.

Заключение

Предложенная в работе методология последовательного проектирования ОС реализуется на основе применения иерархически взаимосвязанных постепенно усложняющихся, в основном за счет расширения числа учитываемых факторов, моделей функционирования ОС СУ. На каждом уровне иерархии последовательного проектирования решается свой комплекс задач. Это позволяет, с одной стороны, экономить ресурсы, отпускаемые на решение проектных задач, а с другой — адаптировать сам процесс проектирования в условиях усложнения и расширения взаимного влияния факторов, определяющих эффективность систем управления сложных человеко-машинных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодальных комплексов. — М.: РАН, 2018. — 314 с.
2. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981. — 488 с.
3. Вязгин В. А., Федоров В. В. Математические методы автоматизированного проектирования. — М.: Высш. шк., 1989. — 183 с.
4. Краснощеков П. С., Морозов В. В., Попов Н. М. Оптимизация в автоматизированном проектировании. Изд. 2, испр. — М.: ЛЕНАНД, 2018. — 328 с.
5. Багрецов С. А. и др. Технология синтеза организационных структур сложных систем управления. — М.: "ВИМИ", 1998. — 224 с.
6. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах: учеб. пособие для студентов вузов. — Калининград: Изд. дом "Слово", 2008. — 344 с.
7. Подиновский В. В. Ногин В. Д. Парето, оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982.
8. Рачина Л. Ю. Автоматизация проектирования структур деятельности проектных организаций в строительстве. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГСУ, 1999. — 19 с.
9. Бурков В. Н., Новиков Д. А. Как управлять проектами. — М.: Наука, 1997. — 227 с.
10. Шашлюк Ю. А., Багрецов С. А., Добрынин В. Н. Управление безопасностью эксплуатации железнодорожных транспортных систем. — М.: ВНИИгеосистем, 2018. — 390 с.
11. Резников Б. А. Системный анализ и методы системы техники. Ч. 1. Методология системных исследований, моделирование сложных систем. — МО ВИКА, 1990. — 513 с.
12. Гладышев А. И., Жуков А. О. Достоинства и недостатки имитационного моделирования с использованием нейронных сетей // Вестник Российского нового университета. Сер. "Сложные системы: модели, анализ и управление". 2013. № 4. С. 53—55.

SEQUENTIAL DESIGN OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES OF HUMAN-MACHINE COMPLEXES

S. A. Bagretsov, R. V. Katyukha

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

A. V. Evenko

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

The article considers the methodology of sequential design of organizational structures of control systems (OS CS) of human-machine complexes, which determines the need for hierarchically interconnected, gradually becoming more complex, due to the expansion of the number of factors taken into account, models of OS CS functioning, which provide a narrowing of the composition of normal functions for selecting OS CS options determined by a set of binary relations. The design problem is considered as a multi-criteria boundary value problem of a multi-step discrete controlled process.

Keywords: design, organizational structure, fuzziness, binary relations, multi-criteria scalarization, transitive closure, Pareto relations.

Bibliography — 12 references.

Received October 1, 2020

АДАПТИВНАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АВИАЦИОННОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Е. Ю. Лушпа, канд. техн. наук

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

На основе экспериментальных данных и учета физических процессов деградации технического состояния авиационного радиоэлектронного оборудования разработана методика аналитического прогнозирования остаточного ресурса. Методика прогнозирования основана на аналитическом моделировании и позволяет экстраполировать получить численные значения остаточного ресурса. Адаптивные свойства методики заключаются в определении этапа старения радиоэлектронных устройств путем сравнения величины диагностического параметра.

Ключевые слова: техническое состояние, диагностический параметр, ресурс, радиоэлектроника, экстраполяция, скорость деградации, градиент.

Безопасность эксплуатации воздушного транспорта в значительной степени определяется бесперебойной работой авиационного радиоэлектронного оборудования (АРЭО). Важная роль при этом отводится определению и прогнозированию его технического состояния (ТС). Прогнозирование технического состояния АРЭО — весьма сложный процесс, в ходе которого требуется решать и увязывать большое количество теоретических и практических задач: оценку текущего технического состояния объекта, прогнозирование развития этого состояния на ближайшее будущее и выдачу на основе этого прогноза рекомендаций об оптимальном остаточном сроке эксплуатации.

Наиболее распространенный метод прогнозирования остаточного ресурса технических устройств основан на применении диагностических средств, техники для обработки полученной информации, программного обеспечения и математического моделирования. Сложность прогноза остаточного ресурса АРЭО в первую очередь связана с разработкой принципов построения алгоритма и описания математической модели прогноза. Математическая модель должна учитывать физику деградации функциональности устройств в период эксплуатации.

Цель данной работы — разработка методики прогнозирования ресурса радиоэлектронных устройств с учетом особенностей их жизненного цикла (ЖЦ). Задачи, поставленные при выпол-

нении работы, заключались в анализе принципов аналитического моделирования диагностических параметров (ДП) и усовершенствовании их за счет индикации этапа старения.

Методика прогнозирования остаточного ресурса

Оценку текущего ресурса АРЭО можно осуществлять путем определения коэффициента относительного технического состояния K_i , который вычисляется по формуле [1]

$$K_i = 1 - \frac{|P_0 - P_{из}|}{|P_0 - P_{п}|}, \quad (1)$$

где P_0 — начальное значение диагностического параметра (ДП) по паспорту;

$P_{из}$ — измеренное значение ДП;

$P_{п}$ — предельное значение ДП по требованиям нормативных документов.

В начале эксплуатации устройства $K_i = 1$. По мере старения оборудования его значение уменьшается до 0.

Для прогнозирования динамики изменения ДП наиболее широко применяют аналитические методы прогнозирования [2, 3], в которых описание изменения ДП представлено многомерной векторной функцией $\xi(t_n)$, наблюдаемой непрерывно или дискретно на интервале от t_0 до t_n в области T_1 настоящих моментов времени. Результаты наблюдений представляют значениями этой функции $\xi(t_0), \xi(t_1), \dots, \xi(t_i), \dots, \xi(t_n)$ в моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_n \in T_1$.

Лушпа Евгений Юрьевич, доцент кафедры "РВСН ВУЦ".
E-mail: euglushpa@list.ru

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2020 г.

© Лушпа Е. Ю., 2020

По известным значениям $\xi(t_i)$ определяют значения функции $\xi(t_{n+1}), \dots, \xi(t_{n+j}), \dots, \xi(t_{n+m})$ в моменты времени $t_{n+1}, \dots, t_{n+j}, \dots, t_{n+m} \in T_2$, принадлежащие области будущих моментов времени T_2 . Оптимальным решением такой задачи является адекватное описание функции $\xi(t)$ приемлемым аналитическим выражением. При этом в большинстве случаев используют методы численного анализа с применением экстраполирующих функций.

Апробация методики аналитического прогнозирования

В целях апробации описанной методики аналитического прогнозирования в качестве экспериментальных данных были использованы статистические данные диагностики радиоэлектронных устройств из исследований С. А. Моисеева [4] (табл. 1).

Проанализированы экспоненциальная, линейная, логарифмическая и степенная функции. В табл. 2 приведены уравнения аппроксимирующих функций изменения показателя остаточного ресурса K_i во времени и значения коэффициентов их достоверности R^2 , полученные регрессионным анализом в Microsoft Excel.

По результатам вычислений можно сделать вывод, что наиболее достоверно описывает процесс деградации ресурса исследуемого радиоэлектронного устройства линейная функция

$$K_i(t) = -a_i t + a_0. \quad (2)$$

Адаптивное прогнозирование

Теоретически отказ АРЭО должен наступить, при исчерпании 100 % ресурса ($K_{пр} = 0$), что будет соответствовать некоторому моменту времени t_p . На практике АРЭО не должно достигать значения $\xi(t_p)$, т. к. это соответствует аварийной ситуации с последствиями.

Таблица 1

Экспериментальные данные изменений мощности сигнала на выходе одноступенчатых радиопередатчиков

№ устройства		Интервал между измерениями $\Delta t = 90$ дней, $P_0 = 70$ Вт, $P_{доп} > 25$ Вт								
		90	180	270	360	450	540	630	720	810
1	P , Вт	44	42	43	44	43	42	45	38	39
	K_i	0,422	0,378	0,400	0,422	0,400	0,378	0,444	0,289	0,311
2	P , Вт	34	32	31	29	30	28	27	23	22
	K_i	0,200	0,156	0,133	0,089	0,111	0,067	0,044	-0,044	-0,067
3	P , Вт	40	42	40	41	39	26	27	27	28
	K_i	0,333	0,378	0,333	0,356	0,311	0,022	0,044	0,044	0,067
4	P , Вт	42	39	40	34	35	35	33	31	32
	K_i	0,378	0,311	0,333	0,200	0,222	0,222	0,178	0,133	0,156

Таблица 2

Уравнения функций и показатели достоверности аппроксимации

№ комплекта	Экспоненциальная	Линейная	Логарифмическая	Степенная
1	$\gamma = 0,4454e^{-0,032x};$ $R^2 = 0,3701$	$\gamma = -0,0111x + 0,4383;$ $R^2 = 0,3444$	$\gamma = -0,035\ln(x) + 0,4319;$ $R^2 = 0,2298$	$\gamma = 0,437x^{-0,099};$ $R^2 = 0,2449$
2	—	$\gamma = -0,0311x + 0,2321;$ $R^2 = 0,9317$	$\gamma = -0,11\ln(x) + 0,2334;$ $R^2 = 0,8078$	—
3	$\gamma = 0,6878e^{-0,328x};$ $R^2 = 0,6107$	$\gamma = -0,0496x + 0,458;$ $R^2 = 0,7367$	$\gamma = -0,169\ln(x) + 0,4504;$ $R^2 = 0,5901$	$\gamma = 0,6796x^{-1,143};$ $R^2 = 0,513$
4	$\gamma = -0,4098e^{-0,121x};$ $R^2 = 0,8678$	$\gamma = -0,0285x + 0,3796;$ $R^2 = 0,8519$	$\gamma = -0,11\ln(x) + 0,3933;$ $R^2 = 0,8716$	$\gamma = 0,4242x^{-0,449};$ $R^2 = 0,8264$
Среднее значение R^2	0,6162	0,7162	0,6248	0,5281

Предельным значением $\xi(t)$, при котором выполняется условие безаварийной эксплуатации, является некоторое допустимое значение $\xi(t)_{\text{доп}}$, а время $t_{\text{доп}}$ есть момент времени, до которого прогнозирование ресурса АРЭО имеет смысл. Если на временном интервале $[t_{\text{н}}, t_{\text{кон}}]$ зарегистрировано некоторое количество результатов измерений ДП, достаточное для определения функции прогнозирования K_i , то оставшийся временной интервал $[t_{\text{кон}}, t_{\text{доп}}]$ является прогнозируемым, где поведение функции определяется скоростью деградации технического состояния, и отображается на изменении численного значения параметра углового коэффициента a_i . В этом случае важно учитывать, что преимущественно все технические изделия имеют жизненный цикл, состоящий из трех основных этапов: приработки, нормального функционирования и старения [5]. Каждому этапу соответствует индивидуальный угловой коэффициент функции a_i . Следовательно, для повышения точности прогнозирования требуется проводить коррекцию a_i , что особенно важно на этапе старения.

В качестве индикатора наступления этапа старения может выступать градиент K_i :

$$\text{grad } K_{i \div i+1} = \frac{K_{i+1} - K_i}{K_i} 100 \%. \quad (3)$$

Градиент K_i отображает, насколько изменился ресурс устройства с момента предыдущей диагностики. В табл. 3 приведен расчет градиента K_i для первого радиоэлектронного устройства, а на рис. 1 показана его графическая зависимость.

На временном участке $[180, \dots, 540]$ $\text{grad } K_i$ находится в пределах 10 %. Это говорит о том, что ресурс планомерно убывает. В моменты времени диагностирования $t = 630$ и 720 наблюдаются скачки $\text{grad } K_i$ до 35 %. Следовательно, можно предполагать, что в этот промежуток времени начинается устойчивая деградация устройства.

Согласно полученным результатам прогноза экстраполяцией линейной функции полное исчерпание ресурса исследуемого АРЭО произойдет в момент времени $t_{\text{доп}} \approx 3500$ дн (рис. 2).

Таблица 3

Расчетные данные градиента K_i

№ устройства		Интервал между измерениями $\Delta t = 90$ дней								
		90	180	270	360	450	540	630	720	810
1	K_i	0,422	0,378	0,400	0,422	0,400	0,378	0,444	0,289	0,311
	$\text{grad } K_i$		10	-6	-5	5	6	-17	35	-8

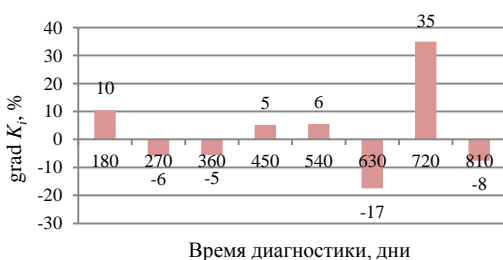


Рис. 1. Диаграмма изменения $\text{grad } K_i$

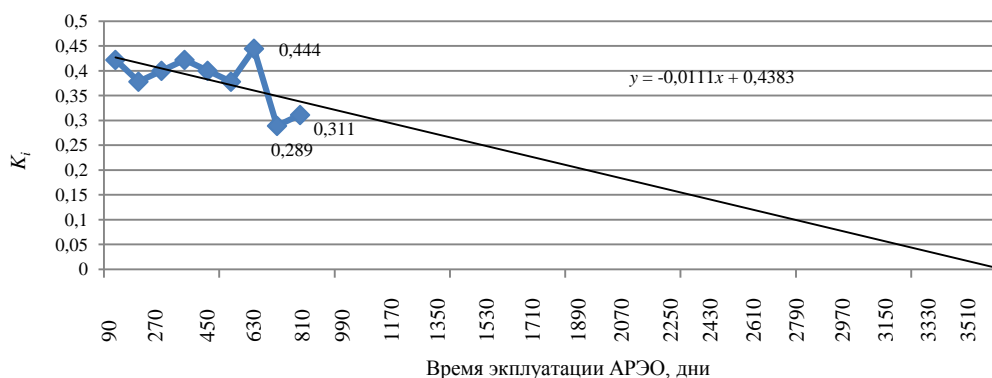


Рис. 2. Изменение показателя ресурса во времени (прямая — аппроксимирующая линейная функция)

Если разбить рассматриваемый интервал времени диагностирования на два участка ([180, ..., 540]; [630, ..., 810]) и проанализировать их по отдельности, то точность прогнозирования $t_{\text{доп}}$ можно значительно повысить (рис. 3).

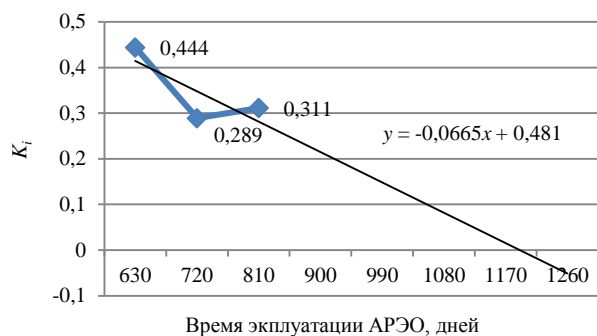


Рис. 3. Линейная аппроксимация диагностических данных и в интервале от 630 до 810 дней

Экстраполяция линейной функции, описывающей изменение K_i на этапе старения АРЭО,

показала, что $t_{\text{доп}}$ значительно меньше, чем при обработке диагностических данных в совокупности ($t_{\text{доп}} \approx 1200$ дней).

Заключение

Адаптивная методика прогнозирования остаточного ресурса АРЭО предполагает ряд математических операций по обработке диагностической информации:

- сбор диагностической информации;
- определение показателя ресурса после каждой диагностики;
- определение этапа старения устройства;
- выбор функции, описывающей деградацию показателя ресурса на этапе старения;
- определение времени достижения показателя ресурса предельного значения.

Результаты прогнозирования по предлагаемой методике можно применять для научного обоснования периодов технического обслуживания и ремонта не только АРЭО, но и других систем летательных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гиря М. П., Штабский Л. М., Бронников А. Г., Манузин А. А., Митюшева И. А. Вопросы продления сроков эксплуатации электротехнического оборудования АЭС // Энергоснабжение. Энергетика. Энергоаудит. 2007. № 9. С. 39—44.
2. Цуприян В. А., Сидорчук В. П. Прогнозирование технического состояния радиоэлектронного оборудования // Радиотехника. 2017. № 11. С. 104—110.
3. Цуприян В. А. Моделирование деградации диагностического параметра радиоэлектронного оборудования // Теория и техника радиосвязи. 2018. № 3. С. 116—124.
4. Моисеев С. А. Метод прогнозирования контроля радиоэлектронной аппаратуры с адаптацией межконтрольного интервала: дис. ... канд. техн. наук. — Орел, 2013. — 198 с.
5. Голоскоков К. П. Технология испытаний и прогнозирования технического состояния электронных средств судовых систем управления: автореф. дис. ... докт. техн. наук. — СПб, 2009. — 38 с.

ADAPTIVE METHOD FOR PREDICTING THE REMAINING LIFE OF AVIATION RADIOELECTRONIC EQUIPMENT

E. Yu. Lushpa

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

Based on experimental data and taking into account the physical processes of degradation of the technical condition of aviation radio electronic equipment, a method for analytical forecasting of the remaining life is developed. The forecasting method is based on analytical modeling and allows extrapolation to obtain numerical values of the remaining resource. Adaptive properties of the method consist in determining the aging stage of radioelectronic devices by comparing the value of the diagnostic parameter.

Keywords: technical condition, diagnostic parameter, resource, radioelectronics, extrapolation, degradation rate, gradient.

Bibliography — 5 references.

Received September 28, 2020

УДК 539.3/4+534/(031)

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ИНЖЕНЕРНОМ ДЕЛЕ И ПРОБЛЕМЫ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ (Часть 2)

^{1, 2} В. А. Волохин; ² И. В. Гракович; ² Н. П. Кузнецов, д-р техн. наук

¹ УЧ ПОО "Нефтяной техникум", г. Ижевск, Россия

² Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия

Рассмотрены особенности выбора механических аналогов технических систем с несколькими степенями свободы, предрасположенных к параметрическим колебаниям, и критериев оценки их динамической устойчивости. Предложены варианты (способы) физического моделирования параметрических колебаний для оценки эффективности теоретических критериев динамической неустойчивости технических устройств.

Ключевые слова: критерии динамической неустойчивости, степени свободы, механические аналоги, моделирование параметрических колебаний.

В первой части авторы на примере испытательных стендов, предназначенных для испытания ракетных двигателей, проанализировали возможности возникновения в каналах замера силовых факторов параметрических колебаний. Рассмотрены вопросы выбора механических аналогов подобных испытательных стендов, которые являются колебательными контурами с одной степенью свободы, а также некоторые аспекты построения соответствующим механическим аналогом дифференциальных уравнений, описывающих колебательные процессы в них.

Рост числа степеней свободы в технической системе, а соответственно, и в механическом аналоге существенно усложняет анализ колебательных процессов, в том числе параметрических колебаний.

В качестве примера рассмотрим стендовую систему, предназначенную для газогенераторных испытаний гипотетического соплового блока с органом управления вектором тяги (ОУВТ) типа поворотное сопло (ПС).

Волохин Виктор Аркадьевич, заместитель директора по учебной работе, соискатель ученой степени канд. техн. наук.
E-mail: kuznetsov953@yandex.ru

Гракович Игорь Валентинович, соискатель ученой степени канд. техн. наук.
E-mail: tmitmm@istu.ru

Кузнецов Николай Павлович, профессор.
E-mail: kuznetsov953@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 1 июня 2020 г.

© Волохин В. А., Гракович И. В., Кузнецов Н. П., 2020

Модель параметрических колебаний по каналу замера управляющей силы соплового блока с поворотным соплом

Схема силоизмерительного стенда при газогенераторных испытаниях высотного соплового блока с поворотным соплом в целях определения его силовых характеристик приведена на рис. 1.

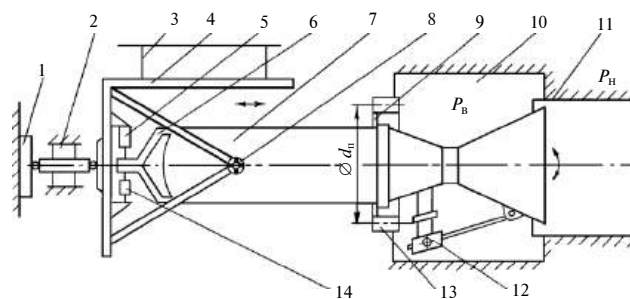


Рис. 1. Схема непроточного высотного стенда с цилиндрической камерой смещения для газогенераторных испытаний высотных поворотных сопел [1, 2]:

1 — датчик осевого усилия; 2 — сепаратор; 3 — подвеска силового каркаса; 4 — динамическая платформа; 5 — устройство предварительного нагружения датчика боковых усилий; 6 — силовой корсет; 7 — двигатель (газогенератор); 8 — упругий шарнир; 9 — переходное кольцо; 10 — вакуумируемая камера; 11 — камера смещения; 12 — узел поворота сопла; 13 — узел компенсации; 14 — датчик бокового усилия

Такой стенд по каналу замера управляющей силы представляет собой механическую систему с двумя степенями свободы: колебания газогенератора и колебания управляющего поворотного сопла в плоскости его поворота в узле подвеса.

В первом приближении, если пренебречь влиянием имитатора высотных условий по кана-

лу замера управляющего усилия, механический аналог стенда будет иметь вид, представленный на рис. 2.

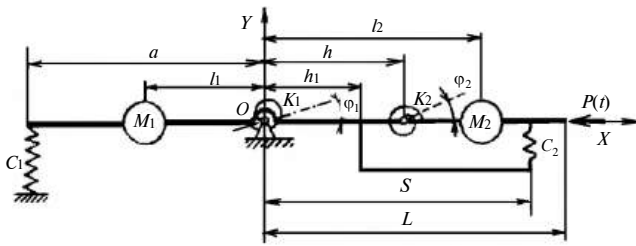


Рис. 2. Механический аналог стенда для газогенераторных испытаний сопловых блоков с поворотным соплом

Механический аналог стенда получен при следующих допущениях:

- массы отдельных элементов стенда и газогенератора, а также поворотного сопла сосредоточены в двух центрах масс;
- центры масс газогенератора и поворотного сопла лежат на продольной оси стенда на расстояниях l_1 , l_2 от точки 0 соответственно (рис. 2);
- суммарные массы элементов стенда и поворотного сопла есть приведенные массы M_1 и M_2 соответственно;
- диссипативными процессами по каждой из степеней свободы пренебрегаем.

Поперечные усилия, действующие на подвижную часть стенда, уравниваются несколькими эквивалентными упругими связями с жесткостями C_i , K_i , имитирующими упругое сопротивление подвески газогенератора K_1 и жесткость эластичного шарнира поворотного сопла K_2 ; C_1 — жесткость датчика управляющего усилия, C_2 — жесткость узла управления поворотом сопла.

Значения приведенных инерционных масс M_1 и M_2 , значения приведенных жесткостей определяют по результатам проведения статической и динамической градуировки стенда.

Как и ранее, будем считать, что в установившемся режиме работы газогенератора осевая составляющая силы тяги $R(t)$ имеет гармоническую составляющую, причем для удобства будем считать, что она подчинена закону косинуса:

$$R(t) = R_0 + \Delta R \cos pt, \quad (1)$$

где R_0 — стационарное значение силы $R(t)$;

ΔR и p — амплитуда и частота изменения силы $R(t)$.

Для малых обобщенных координат φ_1 и φ_2 , используя уравнения Лагранжа 2-го рода, для рассматриваемой системы получим

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_1 + a_1 \ddot{\varphi}_2 + b_1 \varphi_1 + d_1 \varphi_2 &= \eta_1 \varphi_1 \cos pt; \\ \ddot{\varphi}_2 + a_2 \ddot{\varphi}_1 + b_2 \varphi_1 + d_2 \varphi_2 &= \eta_2 \varphi_2 \cos pt, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{M_2 h (l_2 - h)}{M_1 l_1^2 + M_2 h^2}; \quad b_1 = \frac{a^2 C_1 + K_1 + K_2 - R_0 h}{(M_1 l_1^2 + M_2 h^2) p^2};$$

$$d_1 = \frac{K_2}{(M_1 l_1^2 + M_2 h^2) p^2}; \quad \eta_1 = \frac{h \Delta R}{(M_1 l_1^2 + M_2 h^2) p^2};$$

$$a_2 = \frac{h}{l_2 - h}; \quad b_2 = \frac{(S - h)^2 C_2 + K_2 - (L - h) R_0}{M_2 (l_2 - h)^2 p^2};$$

$$d_2 = \frac{K_2}{M_2 (l_2 - h)^2 p^2}; \quad \eta_2 = \frac{\Delta R (L - h)}{M_2 (l_2 - h)^2 p^2}.$$

Перепишем уравнения (2) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + x_1 &= \varepsilon_1 x_1 \cos \Omega \tau + \varepsilon_2 x_2 \cos \Omega \tau; \\ \ddot{x}_2 + \alpha x_2 &= \varepsilon_3 x_1 \cos \Omega \tau + \varepsilon_4 x_2 \cos \Omega \tau, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_1(\tau) = \varphi_1(t) + \rho_1 \varphi_2(t)$; $x_2(\tau) = \varphi_2(t) + \rho_2 \varphi_1(t)$;

$$\tau = t\omega; \quad \omega = \sqrt{\lambda_1}; \quad \alpha = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad \Omega = \frac{p}{\sqrt{\lambda_1}}; \quad \varepsilon_1 = \frac{q_1}{\lambda_1};$$

$$\varepsilon_2 = \frac{q_2}{\lambda_1}; \quad \varepsilon_3 = \frac{q_3}{\lambda_1}; \quad \varepsilon_4 = \frac{q_4}{\lambda_1}; \quad \alpha_1 = \eta_1 \frac{\bar{k}_1}{k_1 + a_2};$$

$$q_1 = \frac{\alpha_1}{1 - \rho_1 \rho_2} - \frac{\alpha_2 \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2}; \quad q_2 = \frac{\alpha_2}{1 - \rho_1 \rho_2} - \frac{\alpha_1 \rho_1}{1 - \rho_1 \rho_2};$$

$$\alpha_2 = \eta_2 \frac{1}{k_1 + a_2}; \quad q_3 = \frac{\alpha_3}{1 - \rho_1 \rho_2} - \frac{\alpha_2 \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2};$$

$$q_4 = \frac{\alpha_4}{1 - \rho_1 \rho_2} - \frac{\alpha_3 \rho_1}{1 - \rho_1 \rho_2}; \quad \alpha_3 = \eta_1 \frac{1}{k_2 + a_1};$$

$$\alpha_4 = \eta_2 \frac{\bar{k}_2}{k_2 + a_1}; \quad \rho_1 = \frac{a_1 \bar{k}_1 + 1}{k_1 + a_2}; \quad \rho_2 = \frac{a_2 \bar{k}_2 + 1}{k_2 + a_1};$$

$$\lambda_1 = \frac{\bar{k}_1 b_1 + b_2}{k_1 + a_2}; \quad \lambda_2 = \frac{d_1 + d_2 \bar{k}_2}{k_2 + a_1}.$$

В приведенных соотношениях параметры \bar{k}_1 , \bar{k}_2 определяются выражениями

$$\begin{aligned} (a_1 b_1 - d_1) \bar{k}_1^2 + (b_1 + a_1 b_2 - d_2 - a_2 d_1) \bar{k}_1 + \\ + b_2 - a_2 d_2 = 0; \\ (a_2 b_2 - d_2) \bar{k}_2^2 + (d_2 + a_2 d_1 - a_1 b_2 - b_1) \bar{k}_2 + \\ + d_1 - a_1 b_1 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве метода нахождения границ областей устойчивости используем метод ускоренной сходимости для периодических уравнений [3, 4], алгоритм применения которого для ряда частных случаев подробно рассмотрен в [5–7]. В соответствии с этим методом предполагается, что x_1 и x_2 разложимы в ряды Фурье:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1^{(0)} + Z_1; \\ x_2 &= x_2^{(0)} + Z_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $x_1^{(0)}$ и $x_2^{(0)}$ — гармонические составляющие этих рядов с частотами Ω , которые задаются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} x_1^{(0)} &= A_1 \sin \Omega \tau + B_1 \cos \Omega \tau; \\ x_2^{(0)} &= A_2 \sin \Omega \tau + B_2 \cos \Omega \tau, \end{aligned} \quad (6)$$

Z_1, Z_2 — остальные составляющие рядов;

A_1, A_2, B_1, B_2 — константы.

Тогда для первой области неустойчивости в i -м приближении решения будут представлены в виде

$$\begin{aligned} x_1^{(i)} &= x_1^{(0)} + Z_1^{(i)}; \\ x_2^{(i)} &= x_2^{(0)} + Z_2^{(i)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя (7) в правые части уравнений (3), получим уравнения для $(i+1)$ -го приближения:

$$\begin{aligned} \left(x_1^{(i+1)} \right)'' + x_1^{(i+1)} &= \\ &= \left(\varepsilon_1 x_1^{(i)} + \varepsilon_2 x_2^{(i)} \right) \cos \Omega \tau = X_1^{(i)} + Z_1^{(i)}; \\ \left(x_2^{(i+1)} \right)'' + r x_2^{(i+1)} &= \\ &= \left(\varepsilon_3 x_1^{(i)} + \varepsilon_4 x_2^{(i)} \right) \cos \Omega \tau = X_2^{(i)} + Z_2^{(i)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $X_1^{(i)}$ и $X_2^{(i)}$ — гармонические составляющие с частотой Ω ;

$Z_1^{(i)}$ и $Z_2^{(i)}$ — остальные составляющие.

Подставляя (7) в левые части уравнений (8), получим

$$\begin{aligned} \left(x_1^{(0)} \right)'' + x_1^{(0)} &= X_1^{(i)}; \quad \left(z_1^{(i+1)} \right)'' + z_1^{(i+1)} = Z_1^{(i)}; \\ \left(x_2^{(0)} \right)'' + r x_2^{(0)} &= X_2^{(i)}; \quad \left(z_2^{(i+1)} \right)'' + r z_2^{(i+1)} = Z_2^{(i)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} R_j(n) &= A_j \sin \Omega \tau + B_j \cos \Omega \tau; \\ k_j(n) &= \left(A - n^2 \Omega^2 \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

где A_j, B_j — константы;

$k_j(n)$ — коэффициент передачи для уравнений колебаний в форме Эйлера:

$$x'' + Ax = \exp(in\Omega\tau).$$

Система уравнений (3) в первом приближении для первой области неустойчивости имеет вид

$$\begin{aligned} \left(x_1^{(0)} \right)'' + x_1^{(0)} &= X_1^{(1)}; \\ \left(x_2^{(0)} \right)'' + r x_2^{(0)} &= X_2^{(1)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставив в (11) соответствующие функции, расписав их и приравняв коэффициенты при \cos и \sin нулю, получим систему алгебраических уравнений относительно неизвестных A_1, A_2, B_1, B_2 в следующем виде:

$$\begin{aligned} N_{11}A_1 + N_{12}A_2 &= 0; \\ N_{23}B_1 + N_{24}B_2 &= 0; \\ N_{31}A_1 + N_{32}A_2 &= 0; \\ N_{43}B_1 + N_{44}B_2 &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{где } N_{11} = 1 - \Omega^2 - \frac{k_1(2)\varepsilon_1^2}{4} + \frac{\varepsilon_2\varepsilon_3k_2(2)}{4};$$

$$N_{12} = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2k_1(2)}{4} - \frac{\varepsilon_2\varepsilon_4k_2(2)}{4};$$

$$N_{23} = 1 - \Omega^2 - \frac{\varepsilon_1^2}{2} - \frac{\varepsilon_1^2k_1(2)}{4} - \frac{\varepsilon_2\varepsilon_3k_2(2)}{4} - \frac{\varepsilon_2\varepsilon_4}{2r};$$

$$N_{24} = -\frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{2} - \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2k_1(2)}{4} - \frac{\varepsilon_2\varepsilon_4k_2(2)}{4} - \frac{\varepsilon_2\varepsilon_4}{2r};$$

$$N_{31} = -\frac{\varepsilon_1\varepsilon_3k_1(2)}{4} - \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3^2k_1^2(2)k_2(3)}{16} - \frac{\varepsilon_3\varepsilon_4k_2(2)}{4};$$

$$N_{32} = r - \Omega^2 - \frac{\varepsilon_2^2\varepsilon_3^2k_1^2(2)k_2(3)}{16} - \frac{\varepsilon_2\varepsilon_3k_1(2)}{4};$$

$$N_{43} = -\frac{\varepsilon_1\varepsilon_3k_1(2)}{4} - \frac{\varepsilon_1\varepsilon_3}{2} - \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3^2k_1^2(2)k_2(3)}{16} -$$

$$-\frac{\varepsilon_3\varepsilon_4k_2(2)}{4} - \frac{\varepsilon_3\varepsilon_4}{2r};$$

$$N_{44} = r - \Omega^2 - \frac{\varepsilon_2^2\varepsilon_3^2k_1^2(2)k_2(3)}{16} - \frac{\varepsilon_2\varepsilon_3k_1(2)}{4} -$$

$$-\frac{\varepsilon_2\varepsilon_3}{2} - \frac{\varepsilon_4^2k_2(2)}{4} - \frac{\varepsilon_4^2}{2r}.$$

Система (12) будет иметь нетривиальное решение тогда и только тогда, когда будет выполняться условие

$$\begin{vmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{31} & N_{32} \end{vmatrix} = 0; \quad \begin{vmatrix} N_{23} & N_{24} \\ N_{43} & N_{44} \end{vmatrix} = 0. \quad (13)$$

Система уравнений (13) определяет границы первой области неустойчивости для системы уравнений (3).

Аналогично можно получить уравнения границ и для последующих областей неустойчивости. Так, в соответствии с изложенной методикой для второй области неустойчивости ($\alpha = 4r$) в пространстве параметров $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, r$ в работах [5, 7] получены следующие функционалы

$$\begin{aligned} L_{11} &= \Omega^2 - 1 + \frac{\varepsilon_1^2}{4(1-4\omega^2)}; \quad L_{12} = L_{24} = \frac{\varepsilon_2}{2}; \\ A_{23} &= \Omega^2 - 1 + \frac{\varepsilon_1^2}{4(1-4\omega^2)} + \frac{\varepsilon_1^2}{2} + \frac{\varepsilon_4 \varepsilon_3}{8r}; \\ L_{31} &= \frac{\varepsilon_3}{2} + \frac{\varepsilon_1^2 \varepsilon_3}{8(1-4\omega^2)(1-9\omega^2)} + \\ &+ \frac{\varepsilon_1^2 \varepsilon_3^2}{8(1-4\omega^2)(1-9\omega^2)} + \\ &+ \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4}{8(1-4\omega^2)(4r-\omega^2)} + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4}{8(1-4\omega^2)(4r-9\omega^2)}; \\ L_{32} &= 4\Omega^2 - 4r + \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{4(1-9\omega^2)} + \\ &+ \frac{\varepsilon_3^2 \varepsilon_2^2}{8(1-9\omega^2)^2(4r-16\omega^2)} + \frac{\varepsilon_4^2}{4(4r-\omega^2)} + \frac{\varepsilon_4^2}{4(4r-9\omega^2)}; \\ L_{43} &= \frac{\varepsilon_3}{2} + \frac{\varepsilon_1^2 \varepsilon_3}{8(1-4\omega^2)(1-9\omega^2)} + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_4}{4(4r-\omega^2)} + \\ &+ \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4}{8(4r-9\omega^2)(1-4\omega^2)} + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4}{8(4r-\omega^2)(1-4\omega^2)}; \\ L_{44} &= 4\Omega^2 - 4r + \frac{\varepsilon_3 \varepsilon_2}{4(1-9\omega^2)} + \\ &+ \frac{\varepsilon_2^2 \varepsilon_3^2}{8(1-9\omega^2)(4r-16\omega^2)} + \frac{\varepsilon_4^2}{4(4r-\omega^2)} + \frac{\varepsilon_4^2}{4(4r-9\omega^2)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Исходя из полученных функционалов N_{ij} и L_{ij} , которые описывают границы опасных зон, можно найти аналитические критерии положения "рабочей точки", характеризующей динамику стеновой системы относительно опасных границ. Для вывода таких критериев запишем систему (13) в виде одного уравнения:

$$\begin{vmatrix} N_{11} & N_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{23} & N_{24} \\ N_{31} & N_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{43} & N_{44} \end{vmatrix} = 0. \quad (15)$$

Для второй зоны неустойчивости получим по аналогии уравнение

$$\begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{43} & L_{44} \end{vmatrix} = 0. \quad (16)$$

Уравнения (15) и (16) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} S_{11}S_{32} &= S_{12}S_{31}; \\ S_{24}S_{43} &= S_{23}S_{44}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $S_{ij} = N_{ij}$ для (15) и $S_{ij} = L_{ij}$ для (16).

Как показывает практика, стеновая система имеет устойчивый режим работы даже при наличии параметрической возмущающей силы, если последняя изменяется с достаточно большой частотой. В этом случае механическая система не успевает "отследить" возмущающую силу. Это условие из (17) будет записано как

$$\Omega \rightarrow \infty. \quad (18)$$

Тогда условие наличия параметрического резонанса для областей неустойчивости будет иметь вид

$$\begin{aligned} S_{11}S_{32} &> S_{12}S_{31}; \\ S_{24}S_{43} &< S_{23}S_{44}. \end{aligned} \quad (19)$$

Если в системе (19) после подстановки в нее координат "рабочей точки" ($m, \Omega_0, \varepsilon_1^0, \varepsilon_2^0, \varepsilon_3^0, \varepsilon_4^0$) одновременно выполняются оба неравенства, то стеновая силоизмерительная система находится в области параметрического резонанса.

В [2] приведен пример оценки динамической устойчивости гипотетического огневого стенда.

При этом следует отметить, что для оценки динамической устойчивости стенда не требуется применения диаграммы Айнса—Стретта, а учет второй степени свободы в огневом силоизмерительном стенде приводит к изменению размеров области основного (первого) параметрического резонанса.

Как уже отмечалось, существующие методы оценки динамической устойчивости неточны, поскольку точные (аналитические) решения дифференциальных уравнений с периодическими по времени коэффициентами отсутствуют [8]. Точность оценки зависит от хода итерационного процесса поиска аналитического решения, что, как следует из последнего примера, связано с достаточно громоздкими вычислениями, в ходе выполнения которых могут быть допущены ошибки. Имеются проблемы с построением (с определением) приведенных характеристик механического аналога, а соответственно, и с определением параметров "рабочей точки" механического аналога. Поэтому, возникает задача по оценке достоверности и эффективности предлагаемых аналитических моделей оценки динамической устойчивости испытательных стендов. Ее решение можно получить только в результате экспериментального моделирования параметрических колебаний в механических системах. Механические аналоги испытательных стендов легко отнести к рычажным системам, в которых, как отмечается в [9], также могут иметь место параметрические колебания.

Моделирование параметрических колебаний в рычажных механических системах

Любой силоизмерительный стенд с установленным в нем реактивным двигателем может служить примером устройства для моделирования параметрических колебаний. Варьируя геометрическими, жесткостными и массовыми параметрами стенда, а также газодинамическими параметрами ракетного двигателя, можно смоделировать различные режимы работы испытательной системы. Обеспечение требуемых параметров периодической составляющей силы, источником которой является двигатель, — крайне сложная задача. Возмущающую силу можно создавать не ракетным двигателем, а внешним газодинамическим источником, механически не связанным с элементами силоизмерительной системы. Внешний источник возмущающей силы позволяет более тонко управлять такими параметрами силового воздействия, как величина постоянной составляющей силового воздействия, амплитуды и частоты гармоник пе-

риодической составляющей силового воздействия. Силовое воздействие может быть осуществлено струей газа, для которой могут быть заданы требуемые характеристики, причем струя воздействует на преграду, установленную на одном из элементов рычажной системы. Схема устройства для моделирования параметрических колебаний в системах с двумя степенями свободы представлена на рис. 3 [10].

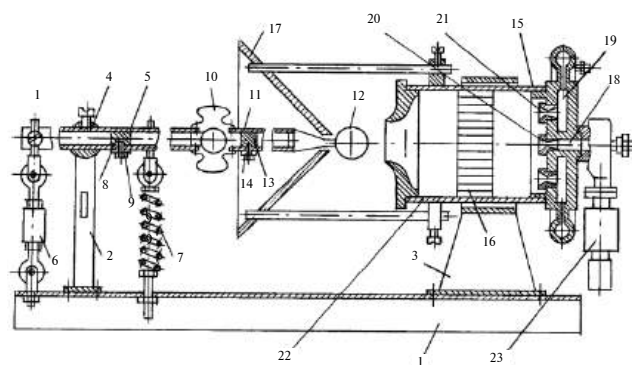


Рис. 3. Схема устройства для моделирования параметрических колебаний в двухстепенных системах (Патент России № 2087211)

Устройство представляет собой механический рычажный аналог испытательного стенда. При работе устройства газ подают в коллекторы 19 и 18. Далее через сопла 20, 21 газ истекает в полость выхлопной трубы 15, в которой установлены выравнивающие решетки 16. За счет решеток происходит выравнивание потока газа, и на выходе из выхлопной трубы в ее выходном сечении создается равномерный по сечению поток газа, который воздействует на преграду 12. Периодическая составляющая силового воздействия на преграду обеспечивается путем придания соответствующего режима работы центральному соплу 20. Частота периодической составляющей задается электромагнитом 23, а амплитуда периодической составляющей определяется давлением газа в коллекторе 18. После взаимодействия с преградой 12 газ по отражательному кожуху 17 отводится из зоны его возможного воздействия на элементы колебательной системы. Возникающие под действием внешней периодической силы колебания рычага 11 передаются через упругий элемент 10 рычагу 5. Колебания рычага фиксируются датчиком усилий 6.

На стадии, предшествующей испытаниям, можно варьировать параметры колебательной системы путем выбора точек закрепления датчика усилий 6 и компенсирующей пружины 7 на рычаге 5, а также вариации положения грузов 8 и 13 на соответствующих рычагах. Непосредственно в ходе испытаний можно варьировать

параметры внешней возмущающей силы. В частности, характеристики второй гармоники могут варьироваться за счет изменения геометрии выхлопной трубы и изменения параметров газа в коллекторе 19. На рис. 3 изображена двухступенная механическая система, однако число степеней свободы экспериментального устройства может быть обеспечено в любом необходимом количестве.

Изложенные теоретические аспекты аналитического определения границ зон динамической неустойчивости могут быть применены и для расчета зон динамической неустойчивости (устойчивости) устройства, изображенного на рис. 3, в частности для его одноступенного механического аналога, для чего достаточно заневолировать одну из степеней свободы системы. Это можно сделать, например, путем исключения из схемы упругой связи 10. Механический аналог устройства моделирования параметрических колебаний для одной степени свободы приведен на рис. 4.

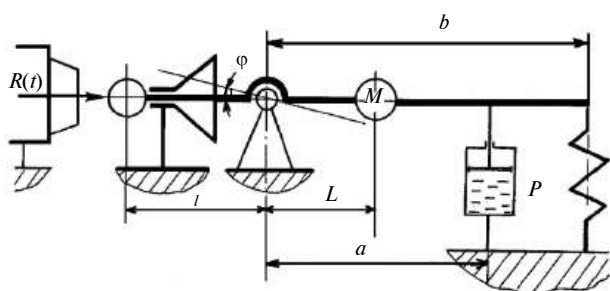


Рис. 4. Механический аналог одноступенного устройства для моделирования параметрических колебаний в рычажных системах

Дифференциальное уравнение малых колебаний одноступенного механического аналога, изображенного на рис. 4, с учетом только первой гармоники будет иметь вид

$$J\ddot{\varphi} + \eta\dot{\varphi} + (Cb^2 - R_0l - \Delta Rl \cos \omega t)\varphi = 0, \quad (20)$$

где J — приведенная инерционная характеристика;
 C — приведенная жесткость системы;
 η — приведенная характеристика демпфирования системы;
 R_0 — стационарное значение силового воздействия;
 $\Delta R, \omega$ — амплитуда и частота первой гармоники силового воздействия.

Детерминированные характеристики механического аналога можно определить в соответствии с методикой построения динамического паспорта силоизмерительной системы [1].

Уравнение (20) фактически является уравнением Матье, но, в отличие от ранее сказанного, здесь учтены демпфирующие характеристики системы, которые, как известно, "отрывают" рабочую точку, характеризующую систему, от оси абсцисс [11]. В экспериментах с устройством, схема которого представлена на рис. 4, а фотография — на рис. 5, варьировали параметры "рабочей точки" устройства.

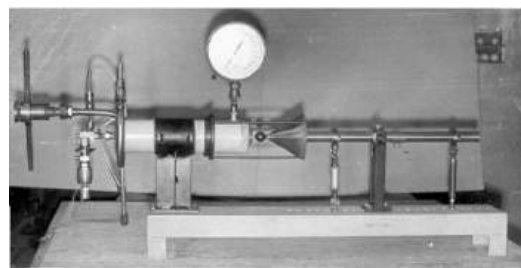


Рис. 5. Устройство для моделирования параметрических колебаний в одноступенной рычажной системе

При определенных значениях "рабочей точки" наблюдалось резонансное возрастание амплитуды колебаний рычага устройства. В работах [1, 10] приведены результаты моделирования параметрических колебаний в одноступенной рычажной системе, колебания которой описываются дифференциальным уравнением Матье.

Конструктивно-компоновочная схема устройства для моделирования колебаний, приведенная на рис. 3, значительно проще, чем схема силоизмерительного стенда, предназначенного для газогенераторных испытаний сопловых блоков с ОУВТ. Однако и это устройство имеет ряд недостатков, снижающих точность и достоверность моделирования параметрических колебаний; цель устройства — экспериментальное подтверждение работоспособности аналитических критериев оценки динамической устойчивости многостепенных механических систем, нагруженных внешней полигармонической силой. Это обусловлено как использованием в конструкции устройства датчиков (датчика) силы, что создает дополнительную связь, налагаемую на рычаги устройства, так и сложностью способа задания внешней периодической силы, для реализации которого используется газодинамический блок с импульсным режимом работы выхлопных трактов. Однако, если отличие расчетных значений параметров газодинамических процессов от экспериментальных результатов составляет не более 15 % считается приемлемым, то такие значения для оценки динамической устойчивости абсолютно не допустимы. В конструкции устройства возможны люфты в узлах закрепления датчиков и упругих элементов на плечах устройства. Бо-

лее того, использование в конструкции устройства компенсирующих пружин может привести к возникновению в системе дополнительных источников параметрического резонанса, поскольку в цилиндрической витой пружине могут возникнуть свои параметрические колебания [12]. Устройство не позволяет моделировать и параметрические колебания, обусловленные изменением по времени инерционных характеристик системы (изменение колеблющейся массы).

От большинства этих недостатков свободно устройство, основанное на использовании в схеме пружины с нелинейными упругими элементами, а в качестве источника периодической внешней возмущающей силы — электрического двигателя (двигателей) с установленным на его оси (осях) несбалансированным диском (дисками).

Устройство с нелинейными упругими характеристиками для моделирования параметрических колебаний

Одной из основных причин параметрических колебаний является нелинейный характер зависимости жесткостных свойств колебательного контура от величины перемещения его подвижного элемента. Эта проблема может быть решена при использовании в качестве упругих элементов не витых пружин, а кривого бруса, выполненного в виде дуги окружности.

Известно, что для описания напряженно-деформированного состояния кривых упругих брусков малой кривизны можно пренебречь продольной деформацией и деформацией сдвига [13]. При выполнении упругого элемента в виде дуги окружности деформация (перемещение) концов дуги под воздействием приложенной к одному из концов дуги силы связана с величиной силы уравнением

$$\delta = k \frac{F \rho^2}{EI}, \quad (21)$$

где δ — перемещение;
 F — приложенная сила;
 ρ — радиус кривизны бруса;
 E — модуль упругости материала бруса;
 I — момент сечения инерции бруса;
 k — коэффициент, описывающий характер закрепления концов кривого бруса.

При деформации кривого бруса (перемещении его концов относительно друг друга в плоскости его продольной оси) изменяется радиус кривизны бруса. Упрощенная расчетная схема деформации кривого бруса приведена на рис. 6.

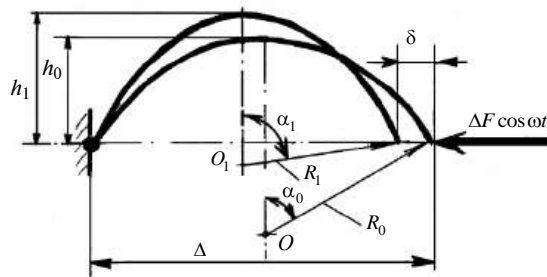


Рис. 6. Расчетная схема деформации кривого бруса

Если считать, что продольная ось кривого бруса является дугой окружности, то, исходя из геометрических соображений (рис. 6), будем иметь

$$(R_0 - h_0)^2 + \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 = R_0^2; \quad (22)$$

$$(R_1 - h_1)^2 + \left(\frac{\Delta - \delta}{2}\right)^2 = R_1^2;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\Delta}{2(R_0 - h_0)}; \quad \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\Delta - \delta}{2(R_1 - h_1)}. \quad (23)$$

Из (22), (23) получим

$$R_1 \approx R_0 - \frac{\Delta}{4h} \delta. \quad (24)$$

Тогда из (22) с учетом (24) и условия

$$R_0 \gg \frac{\Delta}{4h_0} \delta \quad (25)$$

получим

$$F \approx \frac{\delta EI}{k R_0^2 \left(R_0 - \frac{3\Delta\delta}{4h_0} \right)}. \quad (26)$$

Выражение (26) характеризует силу упругости, возникающую при деформации криволинейного бруса.

На рис. 7 показана схема механической колебательной системы с упругим элементом в виде криволинейного бруса, нагруженная внешней возмущающей гармонической силой, которая создается электрическим двигателем (двигателями) с несбалансированным диском. Управляя скоростью вращения ротора (роторов) двигателя (двигателей) и изменяя массу дисбаланса, можно с высокой точностью варьировать параметры внешней периодической силы, действующей на осциллятор.

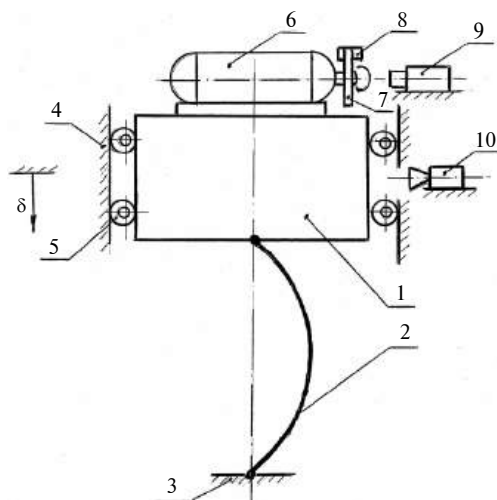


Рис. 7. Схема одноступенного устройства для моделирования параметрических колебаний:

- 1 — динамическая платформа; 2 — кривой брус;
3 — основание; 4 — направляющие; 5 — подшипники;
6 — электрический двигатель постоянного тока; 7 — диск;
8 — дисбаланс; 9 — стробоскоп; 10 — видеокамера

При вращении ротора электродвигателя 6 с постоянной угловой скоростью ω на динамическую платформу 1 будет воздействовать периодическая сила

$$F_1 = m\omega^2 r \cos(\omega t), \quad (27)$$

где m — масса дисбаланса;

r — расстояние от центра масс дисбаланса до оси ротора.

Тогда дифференциальное уравнение колебаний динамической платформы 1 (рис. 7) можно записать в виде

$$M_{\text{пр}} \ddot{\delta} + \eta \dot{\delta} + F = F_1, \quad (28)$$

где $M_{\text{пр}}$ — приведенная инерционная масса;

η — приведенный диссипативный коэффициент системы;

F — упругая (восстанавливающая) сила.

Отсюда с учетом (25) и (26) получим

$$M_{\text{пр}} \ddot{\delta} + \eta \dot{\delta} + \left[\frac{EI}{k} + m\omega^2 r \frac{3\Delta}{4R_0} \cos(\omega t) \right] \delta = m\omega^2 r \cos(\omega t). \quad (29)$$

Уравнение (29) является уравнением Матье с правой частью. Подпружиненная масса с упругим элементом в виде кривого бруса, нагруженная внешней периодической силой, предрасположена к параметрическому резонансу, характеристики которого определяются параметрами

левой части уравнения (29). Следовательно, устройство, схема которого приведена на рис. 7, позволяет моделировать параметрические колебания.

Приведенные характеристики устройства, схема которого дана на рис. 7 $\left(M_{\text{пр}}, \eta, \frac{EI}{k} \right)$,

могут быть определены по результатам статической и динамической градуировки системы, проводимой в соответствии с методиками, изложенными в [1, 10]. В ходе испытаний устройства необходимо задавать определенные угловые скорости вращения ротора электрического двигателя постоянного тока 6 с помощью реостата, включенного в электрическую цепь питания двигателя, (на рис. 7 не показан). При перемещении ползуна реостата будет меняться и величина напряжения в цепи питания двигателя, которая определяет угловую скорость вращения ротора двигателя. Для определения величины напряжения в цепи питания электродвигателя в цепь может быть введен вольтметр (на рис. 7 не показан). Для определения угловой скорости вращения ротора двигателя 6 в устройство введен узел измерения угловой скорости — стробоскоп, обозначенный на рис. 7 позицией 9.

В ходе проведения статической и динамической градуировки устройства, схема которого приведена на рис. 7, необходимо измерять характерные перемещения динамической платформы 1, величина которых δ может быть определена с помощью, например, видеокамеры 10. "Привязав" конкретное значение δ к конкретному моменту времени, можно определить характеристики колебательных процессов в устройстве, т. е. момент возникновения в устройстве резонанса.

Более того, на устройстве, изображенном на рис. 7, можно смоделировать и изменение массы динамической платформы, что существенно влияет на динамическую устойчивость испытательного стенда, предназначенного для испытаний ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) [10]. Установка на динамической платформе 1 (рис. 7) нескольких двигателей с дисками, имеющими различные массы дисбалансов m_i , расположенных на разных расстояниях от осей роторов r_i , при различных угловых скоростях вращения роторов ω_i позволяет смоделировать влияние на динамическую платформу полимодального внешнего силового воздействия.

Варьируя массой динамической платформы 1, можно определить зоны динамической устойчивости колебаний системы как функции ее приведенных параметров и значений частот внешней возмущающей силы.

Значительно более сложной является оценка эффективности аналитических критериев для определения границ зон динамической устойчивости для многостепенных механических систем, нагруженных полигармоническими силами. Это связано с математической сложностью получения критериев и с еще большей сложностью экспериментальной проверки их достоверности и эффективности. Последовательное соединение блоков с конструктивно-компоновочной схемой, приведенной на рис. 7, позволит создать многостепенную механическую систему (степени свободы), нагруженную полигармоническими полимодальными внешними силами. Колебательные процессы в такой системе описывают системой дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами.

Схема двухстепенной механической системы приведена на рис. 8.

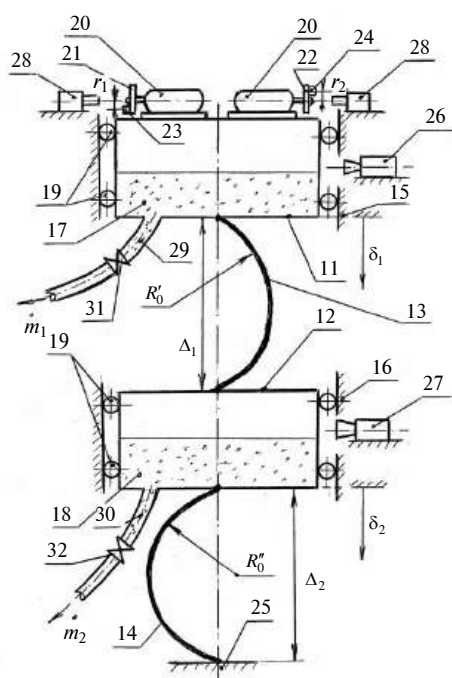


Рис. 8. Схема устройства для моделирования параметрических колебаний в механических системах с двумя степенями свободы, нагруженных двухмодальной внешней силой

Устройство содержит две динамические платформы, 11 и 12, выполненные в виде контейнеров, в которые загружены расходные массы 17 и 18, например песок. Контейнер 11 соединен с контейнером 12 упругим криволинейным брусом 13, а контейнер 12 соединен с основанием 25 посредством криволинейного упругого бруса 14. По направляющим 15 и 16, соответственно, контейнеры 11 и 12 могут совершать возвратно-поступательные движения по координатам δ_1 и δ_2 . Перемещения контейнеров 11 и 12

по направляющим 15 и 16 осуществляют посредством подшипниковых (роликовых) узлов 19. На контейнере 11 установлены два электрических двигателя постоянного тока 20, на осях роторов которых закреплены несбалансированные диски 21 и 22 с соответствующими дисбалансами 23 и 24. Криволинейные бруска 13 и 14 могут отличаться как своими прочностными характеристиками (моменты инерции поперечного сечения I_1 , I_2 и модули упругости E_1 , E_2), так и геометрическими характеристиками Δ_1 , R'_0 и Δ_2 , R''_0 . Характер колебательных процессов по каждой из степеней свободы (переменные δ_1 и δ_2) оценивают либо визуально, либо с помощью видеокамер 26 и 27. Обработав сигналы с видеокамер, можно определить не только амплитуды колебаний контейнеров 11 и 12 по координатам δ_1 и δ_2 , но и частоты этих колебаний. Вариации внешних периодических силовых воздействий реализуют управлением угловой скоростью вращения роторов двигателей 20, несбалансированными массами 23 и 24 и их позиционированием (радиусы r_1 и r_2) на дисках 21 и 22. Из свойств электрических двигателей постоянного тока следует простота управления угловой скоростью вращения ротора двигателя с помощью простейшего реостата. Для каждого двигателя легко получить зависимость положения ползуна соответствующего реостата от угловой скорости вращения соответствующего ротора. Реостаты на рис. 8 не показаны.

Как следует из схемы устройства, приведенной на рис. 8, оно позволяет моделировать в ходе экспериментов изменение массы динамических платформ за счет управления истечением из них песочных (сыпучих) масс через регуляторы расхода 28 и 29, которые могут обеспечить постоянную скорость изменения массы динамических платформ 11 и 12 \dot{m}_1 и \dot{m}_2 соответственно.

Тем самым устройство, схема которого приведена на рис. 8, позволяет физически моделировать динамические процессы в двухстепенных механических системах, нагруженных двухгармонической внешней возмущающей силой. На устройстве можно проверить работоспособность аналитических критериев динамической устойчивости таких систем, аналогичных критериям, приведенным в [3, с. 147—149].

Испытания устройства состоят в воздействии двухмодальной периодической силой, создаваемой несбалансированными массами 23 и 24 при работе электрических двигателей 20. Характеристики обеих мод периодической составляющей силового воздействия на контейнер 11 обеспечиваются управлением угловыми скоростями вращения роторов электрических двигателей с

помощью реостатов, входящих в систему электроснабжения каждого двигателя. В ходе экспериментов возможна синхронизация вращения роторов электрических двигателей 20. В этом случае контейнер 11 будет нагружен внешней одномодальной периодической силой. В ходе экспериментов можно реализовать процесс изменения масс динамических платформ 11 и 12 путем отвода через регуляторы расхода 28 и 29 песка из полостей контейнеров. Управляя работой регуляторов расхода, можно реализовать тот или иной закон изменения массы контейнеров 11 и 12. Управляя законами изменения инерционных характеристик системы (изменение масс контейнеров 11 и 12), можно смоделировать влияние изменения массы испытуемого ракетного двигателя твердого топлива на динамику испытательного стенда.

В ходе испытаний устройства могут варьироваться 4 его характеристики: угловая скорость вращения роторов электрических двигателей 20 и законы изменения массы динамических платформ 11 и 12. Изменяя в процессе испытаний эти параметры, визуальнo или с помощью видеокамер 26 и 27 (рис. 8) определяют факт возникновения в системе резонанса (резкое увеличение амплитуды колебаний), а числовые значения четырех варьируемых параметров в момент возникновения резонанса определяют границы зон динамической устойчивости колебаний механической системы, нагруженной внешними периодическими силами.

Испытания устройства, схема которого приведена на рис. 8, позволяют экспериментально определить зоны динамической устойчивости двухстепенных колебательных систем, нагруженных внешними полигармоническими силами. Зоны динамической устойчивости могут быть определены по аналитическим критериям, полученным тем или иным способом.

На рис. 9 показано устройство для моделирования параметрических колебаний в двухстепенных технических системах, выполненное в соответствии со схемой, приведенной на рис. 8.



Рис. 9. Устройство для моделирования параметрических колебаний в двухстепенных технических системах, нагруженных двухмодальной гармонической внешней силой

Как и по схеме на рис. 8, внешнее двухмодальное силовое воздействие обеспечивается работой двух электрических двигателей постоянного тока с установленными на их осях несбалансированными массами, а управление скоростью вращения роторов двигателей — реостатами. Характер колебательных процессов в устройстве может быть проанализирован исходя из поведения следа от отраженного зеркальной поверхностью, установленной на подвижной массе устройства, луча света, создаваемого, например, лазерной указкой, показанной на рис. 9.

Выводы

Анализ технических систем на предмет возникновения в них параметрических колебаний является одним из эффективнейших механизмов оценки надежности эксплуатации машин, механизмов и сооружений.

Оценку устойчивости колебаний динамических систем обычно проводят на основе анализа поведения механических аналогов динамических систем по соответствующим критериям их динамической устойчивости (неустойчивости). Поэтому важна не только адекватность характера колебательных процессов в аналоге процессам в исходной системе, но и эффективность примененного для такой оценки критерия.

Для механических систем, имеющих несколько степеней свободы, нагруженных внешней полигармонической силой, определение критериев динамической устойчивости для их механических аналогов связано с большими математическими трудностями. Поэтому такие критерии требуют экспериментальной проверки.

Одним из простых и эффективных способов экспериментального моделирования параметрических колебаний является их создание в механическом колебательном контуре. Контур состоит из инерционной массы, перемещение которой ограничено упругой и диссипативной связью, на которую действуют внешние полигармонические силы. Упругая связь имеет нелинейную упругую характеристику, для чего она выполнена в виде криволинейного упругого бруса.

Вариация величиной инерционной массы и законом ее изменения по времени, параметрами внешней возмущающей силы может быть симулирована с помощью установленных на инерционной массе электрических двигателей постоянного тока с расположенными на их осях несбалансированными массами.

Последовательное соединение колебательных контуров с нелинейными упругими характери-

стиками, нагруженных внешними полигармоническими силами, позволяет смоделировать параметрические колебания в многостепенных системах, поведение которых описывается дифференциальными уравнениями (системами дифференциальных уравнений) Матье или Хилла. Тем самым предложенный способ экспери-

ментального моделирования параметрических колебаний позволяет провести оценку эффективности критериев динамической устойчивости таких объектов, как испытательные стенды, предназначенные для испытания ракетных двигателей, автомобильные и железнодорожные многопролетные мосты и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепов В. И., Кузнецов Н. П., Гребенкин В. И. Идентификация силовых характеристик объектов машиностроения. Паспортизация силоизмерительных систем. — М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2002. — 200 с.
2. Антонов Р. В., Гребенкин В. И., Кузнецов Н. П., Мокрушин Б. С., Черепов В. И., Храмов С. Н. Органы управления вектором тяги твердотопливных ракет: расчет, конструктивные особенности, эксперимент / под ред. Кузнецова Н. П. — М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2006. — 552 с.
3. Лесаускис В. О. О вычислении периодических решений и границ устойчивости уравнения Матье // Дифференциальные уравнения и их применение. 1975. № 12. С. 37—45.
4. Лесаускис В. О. О методе ускоренной для линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами // Дифференциальные уравнения и их применение. 1975. № 11. С. 75—92.
5. Кузнецов Н. П. Динамическая устойчивость двухстепенных механических систем при наличии в системе параметрических колебаний // Проблемы теории периодических движений. 1979. № 3. С. 15—22.
6. Кузнецов Н. П. Анализ динамической устойчивости двухстепенных систем при наличии в системе параметрических колебаний // Проблемы современной теории периодических движений. 1982. № 6. С. 39—42.
7. Кузнецов Н. П. Алгоритм расчета границ областей устойчивости двухстепенных механических систем методом ускоренной сходимости // Проблемы современной теории периодических движений. 1981. № 5. С. 25—28.
8. Якубович В. А., Старжинский В. М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
9. Светлицкий В. А. Механика стержней. В двух ч. Ч. 2. Динамика. — М.: Высшая школа, 1987. — 304 с.
10. Кузнецов Н. П., Черепов В. И. и др. Испытание ракетных двигателей твердого топлива. В двух ч. Ч. 2. Стендовые огневые и летные испытания / под общ. ред. Кузнецова Н. П. — М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2011. — 668 с.
11. Шмидт В. К. Параметрические колебания. — М.: Мир, 1978. — 336 с.
12. Хвингия М. В. Вибрация пружин. — М.: Машиностроение, 1969. — 287 с.
13. Курс сопротивления материалов. Ч. 1 / под общ. ред. Филоненко-Бородича М. М. — М.: Физматлит, 1961. — 656 с.

PARAMETRIC OSCILLATIONS IN ENGINEERING SCIENCE AND THEIR MODELLING PROBLEMS (Part 2)

^{1, 2} V. A. Volokhin, ² I. V. Grakovich, ² N. P. Kuznetsov

¹ POO "Petroleum Technical College", Izhevsk, Russia

² Izhevsk State Technical University named after Mikhail Kalashnikov, Izhevsk, Russia

In article are reviewed the features of the choice of mechanical analogues of technical systems with several degrees of freedom, predisposed to parametric oscillations, and criteria for assessing their dynamic stability. Variants (methods) of physical modelling of parametric oscillations are proposed to assess the effectiveness of theoretical criteria for the dynamic instability of technical devices.

Keywords: criteria of dynamic instability, degrees of freedom, mechanical analogues, modeling of parametric oscillations.

Bibliography — 13 references.

Received June 1, 2020

УДК 620.172.24

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦА ИЗ СПЛАВА ВУДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В. В. Спирагин, канд. техн. наук

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

А. И. Чмыхало, канд. техн. наук

Военная академия РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха, Московская обл., Россия

Приведены результаты численного моделирования и механических испытаний разрушения компактного образца 3-го типа, выполненного из модельного сплава Вуда при внецентренном растяжении. Установлено, что выявленные по результатам численного и физического моделирования значения разрушающей нагрузки и коэффициента интенсивности напряжений в вершине клиновидного разреза имеют удовлетворительную сходимость.

Ключевые слова: материаловедение, сплав Вуда, метод конечных элементов, механические испытания.

Для определения основных факторов, влияющих на повреждаемость элементов металлоконструкций, существует объективная необходимость комплексного применения расчетных и экспериментальных методов оценки конструкционной прочности и долговечности металлоконструкций.

Изучение поведения конструкционных материалов при изменении эксплуатационных характеристик, а также процесса их разрушения позволяет в некоторой мере осуществлять прогнозирование работоспособности металлоконструкций и изготовленных из них изделий.

В целях упрощения подобных испытаний модели изготавливают из специальных модельных сплавов, у которых трещиностойкость снижается при повышении температуры более интенсивно, чем сопротивление пластическому деформированию, что обеспечивает трещинообразование в модели и ее разрушение при нагреве [1].

На характер разрушения модельного сплава в первую очередь влияет химический состав основы (матрицы) модельного материала. Первоначально в качестве матрицы использовали свинец.

Однако так как температура плавления свинца довольно высока (327 °С), для растрескивания приходилось нагревать модель до довольно значительных температур, что существенно снижало удобство и качество моделирования. Для устранения данного недостатка в рамках исследования использован сплав Вуда, имеющий температуру плавления порядка 68 °С.

Цель исследования — отработка методики моделирования разрушения металлоконструкций с использованием специального модельного сплава — сплава Вуда.

Численное моделирование внецентренного растяжения образца из сплава Вуда

В целях исследования характеристик трещиностойкости материала сплава Вуда и определения разрушающей нагрузки проведено численное моделирование растяжения компактного образца 3-го типа (ГОСТ 9.903-81) при помощи метода конечных элементов. Задачу решали с помощью CAE-системы предпроцессора Femap 2019.1 (Student lic.) с использованием решателей 36..Simcenter Nastran/Buckling и Nonlinear Static.

Конечно-элементная модель компактного образца 3-го типа по ГОСТу [2] (рис. 1) построена с учетом следующих данных: размер компактного образца 60×60 мм, толщина 18,8 мм с клиновидным пропилом, имитирующим трещиновидный дефект (масштабный коэффициент в Femap 2019.1 задавали в сантиметрах). Материал образца — сплав Вуда с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 2,6 \text{ кН/см}^2$ и пределом прочности $\sigma_b = 4,4 \text{ кН/см}^2$. Модуль упругости E и коэффи-

Спирагин Валерий Викторович, преподаватель.

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

Чмыхало Александр Игоревич, старший научный сотрудник 12-го научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра.

E-mail: himoff2012@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 1 октября 2020 г.

© Спирагин В. В., Чмыхало А. И., 2020

коэффициент Пуассона μ материала приняты равными 1270 кН/см^2 и $0,489$ соответственно [3].

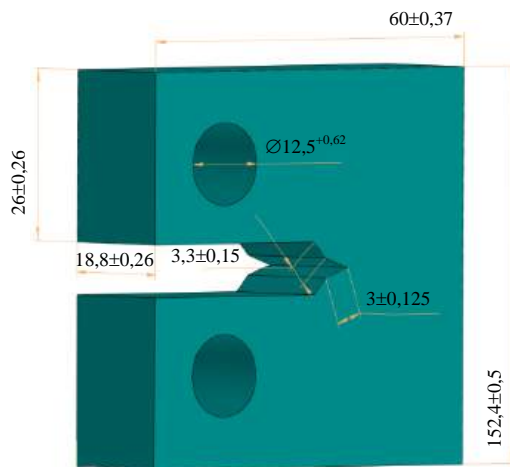


Рис. 1. Геометрическая модель компактного образца 3-го типа

Модель аппроксимирована объемными конечными элементами (КЭ) типа Solid с размерами $0,35 \text{ мм}$. Для более точной аппроксимации клиновидного пропила использовали сетку КЭ с размером элементов $0,1 \text{ мм}$. Общее количество КЭ составило 94410 .

К компактному образцу были приложены следующие граничные условия по внешней поверхности. Верхнее отверстие образца закреплено по осям X , Y и Z (по аналогии закрепления в захвате разрывной машины). К нижней плоскости нижнего отверстия приложена нагрузка, равная 6 кН , по оси минус Y . Качество сетки КЭ и граничные условия представлены на рис. 2. Представленная конечно-элементная модель использована без изменений на всех этапах решения поставленной задачи.

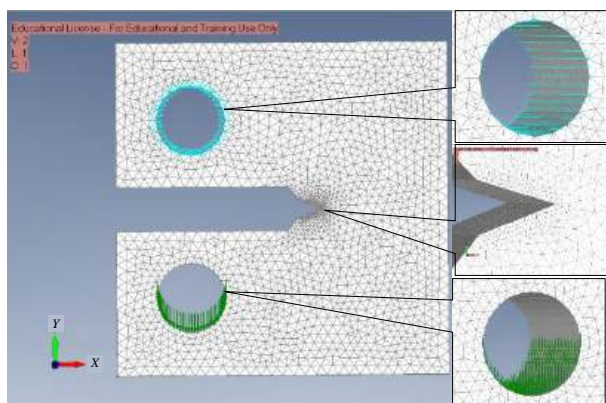


Рис. 2. Сетка КЭ и схема граничных условий:

- ▲ — закрепление (ограничения перемещения по всем степеням свободы);
- — узловая нагрузка (сила)

Для предварительного определения нагрузки, при которой напряжения в материале достигнут предела текучести, выполнен линейный анализ потери устойчивости с использованием решателя Simcenter Nastran/Buckling. В качестве выходного вектора использован вектор напряжений von Mises, определяемый следующей формулой:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}. \quad (1)$$

Критерий von Mises обычно используют как показатель уровня напряженности материала при сложном трехмерном напряженном состоянии. Согласно критерию разрушение материала начинается, если напряжение по von Mises в точке превышает предел текучести материала, т. е. $\sigma_i \geq \sigma_{0,2}$. По результатам расчета установлено, что потеря устойчивости образца происходит при достижении нагрузки, составляющей 25% от заданной (рис. 3), в связи с чем для уменьшения количества шагов нагружения на следующем этапе вычислений нагрузка была уменьшена до 4 кН .

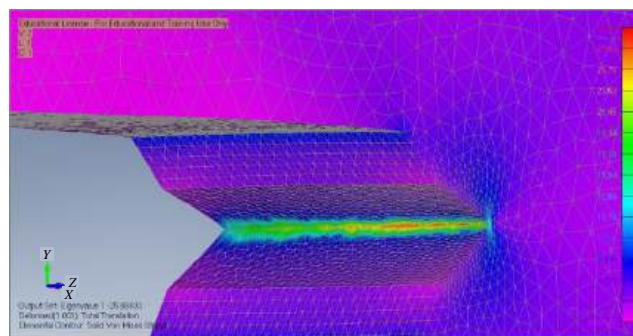


Рис. 3. Результаты линейного анализа потери устойчивости

Далее было проведено конечно-элементное моделирование внецентренного растяжения компактного образца с учетом геометрической нелинейности с использованием решателя Simcenter Nastran/Nonlinear Static. Данный анализ в среде Femap реализован на основе метода Ньютона—Рафсона, согласно которому на каждой итерации отыскивается решение системы линейных алгебраических уравнений согласно итерационной формуле [4]

$$p^{(k+1)} = p^{(k)} + \Delta p; \quad \Delta p = -J^{(-1)} F, \quad (2)$$

- где k — номер итерации;
- p^k — вектор решения на k -й итерации;
- Δp — вектор направления поиска решения;

F — вектор значений функций, составляющих правую часть системы нелинейных уравнений;

J — матрица Якоби, состоящая из частных производных 1-го порядка.

В результате проведения конечно-элементного моделирования внецентренного растяжения произведена оценка напряженно-деформированного состояния образца. По результатам анализа эпюр эквивалентных напряжений, представленных на рис. 4, и графика распределения эквивалентных напряжений в вершине клиновидного пропила от прилагаемой нагрузки (рис. 5) установлено, что напряжения в вершине клиновидного пропила превысили временное сопротивление разрыву при достижении нагрузки, составляющей 69,6 % от заданной (2,78 кН, что эквивалентно нагрузке в 284,3 кг·с).

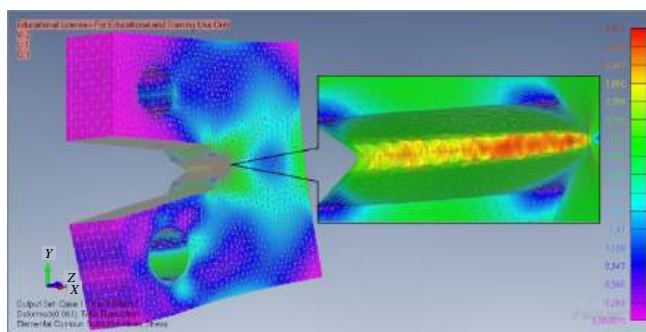


Рис. 4. Результаты конечно-элементного моделирования внецентренного растяжения компактного образца с учетом геометрической нелинейности

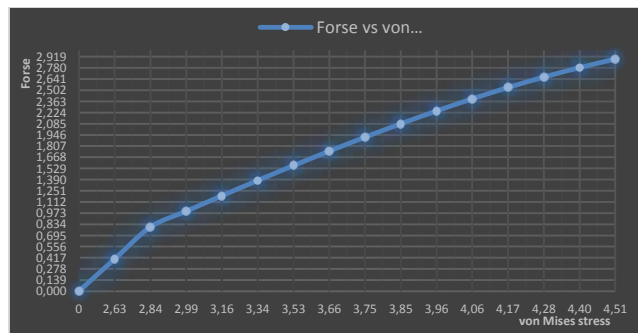


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений в вершине клиновидного пропила при внецентренном растяжении компактного образца

С учетом полученных данных для определения расчетного значения характеристики статической трещиностойкости сплава Вуда установлен коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_C для образца заданной толщины и типа по формулам

$$K_C = \frac{P_C}{t \sqrt{b}} Y_3 = 7,59 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}, \quad (3)$$

где P_C — максимальная нагрузка, действующая на образец, кг;

t, b — геометрические размеры образца, м;

Y_3 — поправочный коэффициент для образца данного типа, зависящий от геометрических размеров образца и средней длины l исходной усталостной трещины:

$$Y_3 = 13,74 \left[1 - 3,380 \frac{l}{b} + 5,572 \left(\frac{l}{b} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Механические испытания образца из модельного сплава Вуда

В целях подтверждения или опровержения полученных расчетных значений проведены механические испытания для определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) образцов при статическом нагружении [5]. Испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506-85 [6]. Планирование исследования трещиностойкости, а также статистическую обработку полученных результатов выполняли в соответствии с требованиями РД 50-705-91 [7].

Для получения испытательных образцов заданных форм и размеров [6] была изготовлена литейная форма. При ее изготовлении применяли силиконовую смесь для создания форм на основе олова (Arline) (рис. 6).



Рис. 6. Форма для отливки испытательных образцов

Нагружение образцов до разрушения проводили при комнатной температуре на испытательной машине TIRAtest 2300, создающей усилие разрыва до 10 т (рис. 7), со скоростью перемещения подвижного захвата 0,2 мм/с.

После разрушения образцов определяли длину инициирующего надреза с округлением до 0,1 мм. Измерение длины трещины производили на компараторе (с погрешностью не более 0,01 мм) и вычисляли как среднее арифметиче-

ское измерений в трех точках на контуре надреза, расположенных через равные промежутки по толщине образца, исключая боковые поверхности. Если какой-либо из результатов измерений отличался более чем на 10 %, то образец отбраковывали.

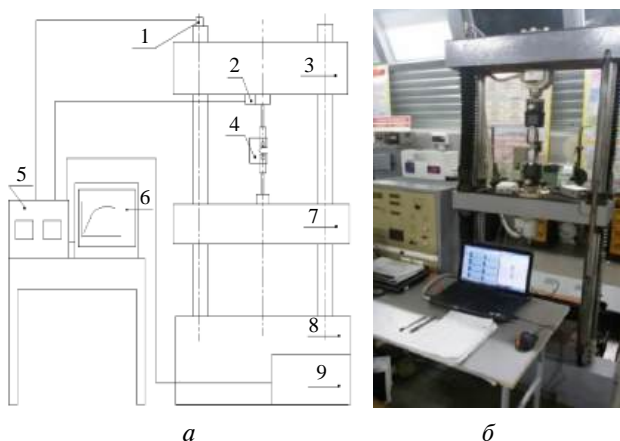


Рис. 7. Испытательная разрывная машина TIRAtest 2300:

а — схема; б — общий вид;

1 — датчик перемещения; 2 — датчик усилия; 3, 8 — неподвижные станины машины; 4 — образец; 5 — блок обработки показаний датчиков; 6 — ПЭВМ для обработки и отображения результатов испытаний; 8 — подвижная траверса машины; 9 — электрический двигатель машины

Статистическую обработку результатов испытаний проводили для распределения Стьюдента с доверительной вероятностью $\beta = 0,9$. В качестве критерия для отбрасывания резко выделяющихся результатов испытаний применяли критерий Смирнова.

Согласно результатам проведенных испытаний средняя нагрузка, при которой происходило начало разрушения образцов, составила (259 ± 18) кг, что сопоставимо с расчетными данными, полученными методом конечных элементов. Экспериментальное значение КИН K_C составило $(7,2 \pm 0,8)$ МПа·м^{1/2}.

Анализ структуры поверхности разрушения образца (рис. 8, в, г) показал, что образуемый излом характеризуется наличием двух ярко выраженных областей. Верхняя часть излома обладает ямочной структурой, характерной для механизма интеркристаллитного растрескивания. В этой области заметных пластических деформаций не наблюдается. Структура излома характеризуется ярко выраженной пористостью по границам зерен.

Нижняя область (зона долома) имеет характерный для транскристаллитного разрушения матовый излом. Заметны существенные пластические деформации в виде губ среза.

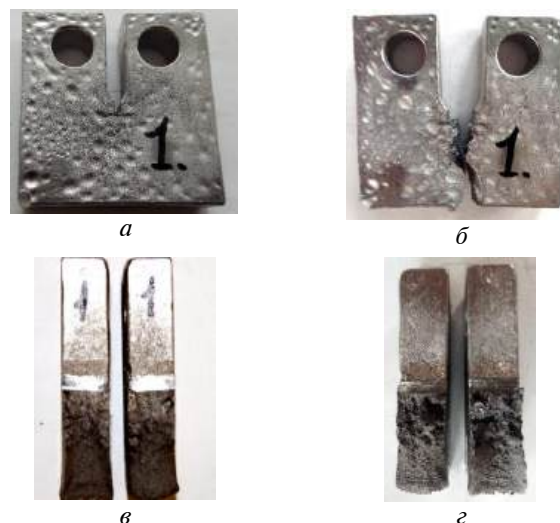


Рис. 8. Излом образца, изготовленного из сплава Вуда

Сравнение структуры поверхностей разрушения образца и результатов конечно-элементного моделирования распространения напряжений в сечении образца (рис. 9) показало, что в обоих случаях от середины излома образуются две зоны деформации.

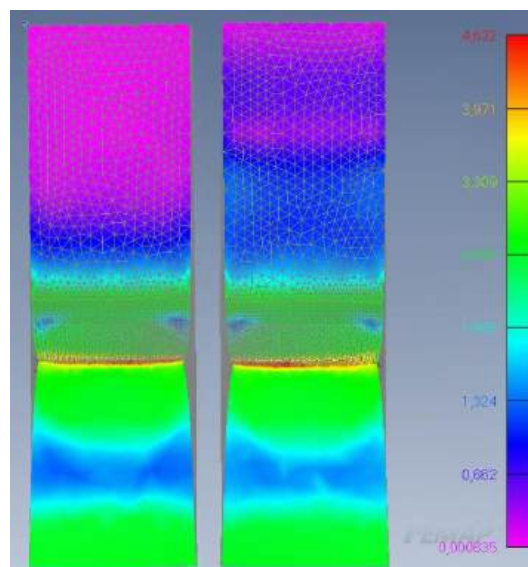


Рис. 9. Распространение напряжений в материале образца, в процессе его разрушения

Выводы

Результаты проведенных исследований подтверждают, что значения разрушающей нагрузки и характерные особенности разрушения образца из сплава Вуда, полученные с применением численного метода моделирования, реализованного

в программном комплексе Femap, не только согласуются с результатами экспериментов, но и дополняют их необходимыми данными о пространении разрушающих напряжений в материале образца в процессе разрушения. Кроме того, высокая сходимость расчетных ($7,59 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) и экспериментальных ($(7,2 \pm 0,8) \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) [5] значений коэффициента интенсивности напряжений $K_{\text{с}}$ позволяет обоснованно применять методы численного моделирования при расчете прочностных характеристик конструкций.

В то же время имеющихся данных по динамическим изменениям механических характеристик образцов из сплава Вуда в процессе изменения температуры пока недостаточно для полномасштабного вытеснения метода физического моделирования процесса разрушения конструкций при прогнозировании моделей разрушения крупных конструкций при помощи сплава Вуда.

Направлением дальнейших исследований является оценка динамического изменения механических характеристик сплава Вуда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гневко А. И., Логвинюк П. И., Кочкин Д. Н., Едомских А. А. Способ моделирования разрушения конструкций. А. с. 1232988 СССР, МПК: G01N 3/00. № 3846318/25-28. Заявл. 28.01.85. Оpubл. 23.05.1986. Бюл. № 19. — 2 с.
2. ГОСТ 9903-81 Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы высокопрочные. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 23 с.
3. Белл Ф. Дж. Экспериментальные основы механики деформируемых тел. Ч. 1. Малые деформации / Пер. с англ. / под ред. Филина А. П. — М.: Физматлит, 1984. — 600 с.
4. Ганеев Р. М., Крючков А. В., Максименко А. О. Решение системы линейных алгебраических уравнений в параметрическом моделировании // САПР и графика. 2004. № 6.
5. Тихомиров В. А., Мукомела М. В., Медеяев И. А., Чмыхало А. И. Совершенствование материала для моделирования разрушения конструкций: сб. "Механические свойства современных конструкционных материалов". Москва. 17—18 сентября 2020 г. — М.: ИМЕТ РАН, 2020. С. 77, 78.
6. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 66 с.
7. РД 50-705-91 Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Планирование и статистическая обработка результатов статических испытаний и испытаний на усталость. — М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1992. — 173 с.

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A WOOD'S ALLOY SAMPLE USING NUMERICAL FINITE ELEMENT SIMULATION

V. V. Spiryagin

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

A. I. Chmykhalo

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

The article presents the results of numerical modeling and mechanical tests of fracture of a compact specimen of type 3, made of a model Wood's alloy under eccentric tension. It was found that the values of the breaking load and the stress intensity factor at the apex of the wedge-shaped section revealed by the results of numerical and physical modeling have satisfactory convergence.

Keywords: materials science, Wood's alloy, finite element method, mechanical testing.

Bibliography — 7 references.

Received October 1, 2020

УДК 546.78:541.135.3:621.357.7

СОСТАВЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМОВЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ РАСПЛАВЛЕННЫХ СОЛЕЙ И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ (Обзор)

Е. Г. Афонин, канд. хим. наук

АО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств»,
г. Калуга, Россия

Рассмотрены химические составы, представлены некоторые физико-химические, технологические характеристики и особенности применения в промышленности (данные взяты из научно-технической литературы) расплавленных солевых электролитов, а также водных и неводных электролитов для получения покрытий металлическим вольфрамом поверхностей различных материалов электрохимическим методом.

Ключевые слова: вольфрамовые покрытия, электрохимическое осаждение, расплавленный солевой электролит, водный электролит, ионная жидкость, неводный электролит.

Покрытие деталей вольфрамом проводят в тех случаях, когда необходимо придать им высокую коррозионную стойкость при работе в агрессивных средах, устойчивость к износу и повышенным температурам, а также высокую твердость. Текстурированные вольфрамовые покрытия наносят при производстве плазменных термоэмиссионных преобразователей.

Покрытия металлическим вольфрамом поверхностей металлов, сплавов, композитных материалов получают различными методами: термическим разложением карбонила вольфрама $W(CO)_6$ при 300–800 °С [1], осаждением из газообразных смесей WCl_6 или WF_6 с водородом на нагретой поверхности [2, 3], осаждением из эфирного раствора WCl_6 за счет его восстановления цинком, предварительно электроосажденным на поверхности в качестве жертвенного покрытия [4], нанесением порошка или фольги вольфрама на поверхность с последующей обработкой покрытия путем воздействия электрической дуги в среде инертного газа или импульсного тока высокой плотности [5], плазменным распылением [6–10], электрохимическим или химическим осаждением покрытия оксидами вольфрама с последующим их восстановлением до металла водородом при повышенной температуре [11, 12], электрохимическим осаждением металлического вольфрама из расплавленных солевых электролитов, ионных жидкостей, водных и неводных растворов [13–89] и т. д. [90].

В настоящем обзоре рассмотрены химические составы электролитов для электрохимического нанесения покрытий металлическим вольфрамом из расплавленных солевых систем [13–73], ионных жидкостей [74], водных [14, 75–85] и неводных [80, 86–89] растворов.

Химический состав и некоторые свойства расплавленных солевых электролитов для получения покрытий вольфрамом

Возможность нанесения покрытий вольфрамом из расплавленных электролитов, их структура (столбчатая, блочная, сферолитная, слоистая) и прочность сцепления с материалом подложки определяются химическим составом расплава (химические формы компонентов, концентрации компонентов, степень окисления вольфрама), плотностью тока на катоде и аноде, температурой, природой и структурой материала подложки (сталь, молибден, медь, никель, титан, графит и т. д.), атмосферой (воздух, азот, аргон, диоксид углерода).

Для получения покрытий металлическим вольфрамом используют расплавленные солевые электролиты (табл. 1), которые по химическому составу можно условно разделить на галогенидные (1–5), оксидно-вольфраматные (6–16), галогенидно-вольфраматные (17–28) и другие (29) [13–73]. В галогенидных расплавах источником вольфрама являются бромиды, хлориды или фториды вольфрама (+4, +5), а основой ("растворителем") — фториды и хлориды щелочных металлов и цинка. Оксидно-вольфраматные электролиты не содержат галогенид-ионов; они состоят из индивидуальных, но чаще эвтектических смесей вольфраматов щелочных металлов

Афонин Евгений Геннадиевич, старший научный сотрудник.

E-mail: afonineg.chem@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13 августа 2020 г.

© Афонин Е. Г., 2020

M_2WO_4 , иногда с добавлением оксида вольфрама(+6), оксида цинка, боратов или дисульфатов щелочных металлов. Галогенидно-вольфраматные расплавы чаще всего составлены из хлоридного комплекса вольфрама(+4) K_2WCl_6 или хлоридов (фторидов) щелочных металлов MCl (MF), $M = Li, Na, K$, или хлорида кальция

$CaCl_2$, а также кислородных соединений вольфрама(+4, +6): $WO_2, WO_3, Na_2WO_4, CaWO_4$, иногда с добавлением дифосфата, полифосфата, карбоната или бората щелочного металла, оксида бора B_2O_3 . Отдельную группу образует электролит вольфрамирования цинка (29) (табл. 1), основой которого служит карбамид.

Таблица 1

Химический состав и технологические характеристики некоторых расплавленных солевых электролитов для получения покрытий металлическим вольфрамом

№	Компоненты электролита	Концентрации компонентов	$i_k, A/дм^2$	$t, ^\circ C$	$\eta_k, \%$	Свойства вольфрамового покрытия	Источник
1	WF_4, WF_5 (в пересчете на W) LiF, NaF, KF (эвтектика)	4,2 масс. % или 5 масс. % Остальное	2—3 7,5 1—10	750 600 750	~ 100	Плотное прочно сцепленное с материалом основы (вольфрам, медь, графит) непористое покрытие	[22]
2	WCl_4 $CsCl$	7,7—13,6 масс. % Остальное	> 2	850—950	81—98	Сплошное прочно сцепленное с основой покрытие толщиной 100—200 мкм	[31]
3	Cs_2WCl_6 $CsCl$	4—10 масс. % 90—96 масс. %	2—90	750—800		Покрытие на вольфраме	[25]
4	K_2WCl_6 NaF KCl	2—20 масс. % 27—34 масс. % Остальное	5—60	700 800—900	70—80 95—100	Сплошное мелкокристаллическое покрытие на молибдене, вольфраме, графите толщиной до 3000 мкм	[34]
5	K_2WCl_6 $NaCl$ KCl	15—38 масс. % 31—42,5 масс. % Остальное	10	900	93—100	Сплошное покрытие толщиной до 3000 мкм	[30]
6	Li_2WO_4	100 %	7,5	Выше 950		Покрытие на меди	[13]
7	Na_2WO_4	100 %	6	900		Отлично сцепленное с медным субстратом однородное покрытие без трещин и отверстий	[70]
8	$Li_2WO_4 + K_2WO_4$ (эвтектическая смесь)		7,5	900		Покрытие на меди	[13]
9	$Na_2WO_4 + K_2WO_4$ (эвтектическая смесь)		7,5	900		Покрытие на меди	[13]
10	Na_2WO_4 WO_3	95 мол. % 5 мол. %	4—12	850—900		Покрытие толщиной до 500 мкм субстрата из титана, предварительно покрытого никелем	[56]
11	Na_2WO_4 WO_3	75 мол. % 25 мол. %	4	900		Однородное покрытие без трещин толщиной до 810 мкм на графите (импульсный ток)	[66]
12	Li_2WO_4 Na_2WO_4 WO_3	32 масс. % 38 масс. % 30 масс. %	10—80	900			[38]
13	WO_3 ZnO Na_2WO_4	20—33 мол. % 14—16 мол. % Остальное	10 30	715 900		Покрытие чистым вольфрамом толщиной 50-150 мкм на меди, никеле, молибдене, графите	[32]
14	WO_3 ZnO Na_2WO_4	15—30 мол. % 15,7—19 мол. % Остальное	10	850—950		Гладкое покрытие вольфрамом на меди, молибдене	[44]

№	Компоненты электролита	Концентрации компонентов	i_k , А/дм ²	t , °С	η_k , %	Свойства вольфрамового покрытия	Источник
15	WO ₃ Na ₂ WO ₄ Li ₂ WO ₄ NaBO ₂ LiBO ₂	15,6 масс. % 19,8 масс. % 17,7 масс. % 26,7 масс. % 20,2 масс. %	4,6—6,2	900	99	Покрытие на никеле, нержавеющей стали, молибдене	[14, 15]
16	Na ₂ WO ₄ Na ₂ S ₂ O ₇	92,5 мол. % 7,5 мол. %	8—10	900		Покрытие толщиной до 200 мкм	[46, 47]
17	CaWO ₄ CaCl ₂	10—30 масс. % 70—90 масс. %	20—30	1100	100		[38]
18	CaWO ₄ CaCl ₂ CaO	10 масс. % 87 масс. % 3 масс. %	30	900—950		Покрытие на стали, никеле, молибдене	[21]
19	Na ₃ WO ₃ F ₃ NaCl	40 масс. % 60 масс. %	20	930		Плотное прочно сцепленное с медной основой пластичное покрытие толщиной 10—50 мкм	[27]
20	Cs ₂ WCl ₆ NaOH или KOH CsCl	11—54 масс. % 0,2—9,2 масс. % Остальное	2—50	800—960	~ 100	Сплошное покрытие на графите, молибдене, вольфраме толщиной до 3000 мкм	[36]
21	K ₂ WCl ₆ NaOH или KOH NaF KCl	5,2—25 масс. % 0,15—6 масс. % 27—35 масс. % Остальное					
22	WO ₃ NaCl KCl NaF	7,3 масс. % 33,85 масс. % 33,85 масс. % 25 масс. %	5	800		Покрытие на вольфраме	[69]
23	WO ₃ B ₂ O ₃ KF	7 мол. % 26 мол. % 67 мол. %	3	850		Твердое компактное покрытие без трещин и пустот толщиной 13 мкм на меди	[53]
24	WO ₃ B ₂ O ₃ KF	7 мол. % 26 мол. % 67 мол. %	2,5—5,5	900		Гладкое покрытие на меди, никеле, нержавеющей и мягкой стали	[43]
25	WO ₂ BaWO ₄ NaCl + KCl (эквивалентная смесь)	5—9 масс. % 32,0—37,7 масс. % Остальное	1—9	800—900		Высококачественное покрытие толщиной 40—50 мкм на графите, никеле, ниобии, тантале, титане, молибдене	[35]
26	Na ₂ WO ₄ NaCl + KCl (эквивалентная смесь) NaPO ₃ Na ₄ P ₂ O ₇	8 мол. % 89,25 мол. % 0,25 мол. % 2,5 мол. %	10	700		Плотное мелкокристаллическое покрытие толщиной больше 50 мкм	[26]
27	Na ₂ WO ₄ NaPO ₃ NaCl + KCl (эквивалентная смесь)	2,5 мол. % 0,35 мол. % Остальное	1—15	650 или 900		Равномерное непористое сцепленное с основой покрытие	[68]
28	Na ₂ WO ₄ Na ₂ CO ₃ NaCl	20—21,5 масс. % 0,5—1,5 масс. % 78,5—80 масс. %	60—80	850—900		Покрытие толщиной до 20 мкм (при многократном проведении электролиза до 40—60 мкм) на меди	[20]
29	Вольфрамат щелочного или щелочноземельного металла NH ₄ Cl CO(NH ₂) ₂	2—5 масс. % 1—2 масс. % 93—97 масс. %	0,5—5,0	140—180		Светло-серое мелкокристаллическое сцепленное с цинковой основой покрытие толщиной 2—10 мкм	[33, 45]

Примечания: масс. % — концентрация в массовых процентах; мол. % — концентрация в мольных процентах; i_k — катодная плотность тока; t — рабочая температура электролита; η_k — катодный выход по току.

Расплавленные галогенидные, галогенидно-вольфраматные и оксидно-вольфраматные электролиты вольфрамирания обычно работают при температурах 700—900 °С; катодная плотность тока 1—80 А/дм²; катодный выход металла по току 80—100 % (табл. 1). В [51, 52] предложен расплавленный электролит состава 60 мол. % ZnCl₂—20 мол. % NaCl—20 мол. % KCl с добавлением 4 мол. % KF, в котором растворено 0,54 мол. % WO₃, позволяющий получать на никелевом субстрате гладкие и плотные покрытия вольфрамом толщиной 2,5 мкм уже при 250 °С. При той же температуре работает галогенидный электролит ZnCl₂—NaCl—KCl—WCl₄ (с добавлением KF) [48]. К низкотемпературным можно отнести и расплавленный галогенидный электролит ZnBr₂—NaBr—WBr₅ (350—450 °С) для покрытия никеля вольфрамом [39, 41]. Еще одним исключением является низкотемпературная система (29) с карбамидом (табл. 1).

При некоторых составах солевых электролитов и технологиях вольфрамирания (2, 15, 19—21, 28) (табл. 1) для предотвращения окисления материала подложки и вольфрамового покрытия, для поддержания постоянства состава электролита при электролизе требуется создание инертной атмосферы аргона или азота.

Многие из разработанных составов расплавленных солевых электролитов (табл. 1) позволяют получать мелкокристаллические покрытия вольфрамом светло-серого цвета толщиной иногда до 3 мм, прочно сцепленные с материалом основы (медью, молибденом, вольфрамом, никелем, ниобием, танталом, титаном, платиной, цинком, графитом).

Ионные жидкости для получения покрытий вольфрамом

В работе [74] показано, что при использовании ионной жидкости тетрафторобората 3-метил-1-этилимидазолия из кластерного комплекса W₃O₂(O₂CCH₃)₆(H₂O)₃(CF₃SO₃)₂ на платиновом электроде происходит электроосаждение металлического вольфрама.

Химический состав и некоторые свойства водных электролитов для получения покрытий вольфрамом

Для электроосаждения покрытий металлическим вольфрамом предложено использовать водный раствор цианидного комплекса W(+4) (1) (табл. 2), но детали процесса не раскрыты [79].

Таблица 2

Химический состав и некоторые технологические характеристики водных электролитов для получения покрытий молибденом

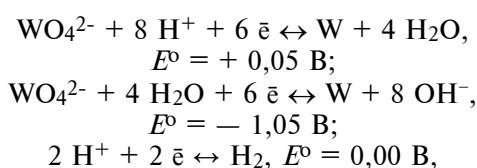
№	Компоненты электролита	Концентрации компонентов	pH	i_k , А/дм ²	t , °С	η_k , %	РС, %	Примечание	Источник
1	K ₄ [W(CN) ₈]·2H ₂ O (в пересчете на W)	~ 30 масс. %						Плотное вольфрамовое покрытие	[79]
2	Вольфрамат аммония Иодид калия Сульфат натрия Гидроксид аммония	40—60 г/л 60—80 г/л 190—210 г/л 90—110 мл/л		6—10	50—60	5,4	16,2	Компактное покрытие вольфрамом (99,67 %)	[84]
3	WO ₃ Na ₂ CO ₃	125 г/л 330 г/л	13	5—10	100	~ 1			[82]
4	WO ₃ KF NaOH	60 г/л 30—40 г/л 60 г/л			Выше 60				[81]
5	Вольфрамат натрия (в пересчете на W) Фтороводородная кислота Гидроксид натрия	10 г/л 50 г/л 20 г/л	2	200	22		10—12	Светлое блестящее прочно сцепленное с основой покрытие вольфрамом толщиной 3—5 мкм	[83]
6	Вольфрамат натрия (в пересчете на W) NH ₄ HF ₂	1,5—20 г/л 70—250 г/л		100—500	20—50	0,32—0,48	51—70	Вольфрамовое покрытие на медь	[85]

Примечания: i_k — катодная плотность тока; t — рабочая температура электролита; η_k — катодный выход по току; РС — рассеивающая способность электролита.

Созданы щелочные [75–77, 82], цитратный [78], фторидные [81, 83, 85] и некоторые другие [14, 80] водные электролиты для получения покрытий металлическим вольфрамом (табл. 2). Во многих случаях удаётся получить лишь тонкие слои вольфрама [80].

В водных электролитах (3–6) (табл. 2) источником вольфрама является вольфрамат натрия, содержащий W(+6), который во фторидных электролитах (4–6) (табл. 2) может образовывать фторо- и оксофторокомплексы типа $[WF_7]^-$, $[WF_8]^{2-}$, $[WO_2F_n]^{(n-2)-}$.

Осаждение на катоде металлического вольфрама в водном электролите непосредственно из вольфрамат-иона WO_4^{2-} затруднено как из-за неблагоприятной термодинамики процесса



так и вследствие низкого перенапряжения выделения водорода на вольфраме. Поэтому катодный выход металла всегда невелик (табл. 2) и большая часть электрического тока расходуется на образование H_2 .

Химический состав неводных электролитов вольфрамирания

Сообщается об электроосаждении вольфрамовых покрытий из жидкого аммиака, из раствора WCl_6 в ацетоне или в глицерине [80], а также о непригодности растворов солей воль-

фрама в органических растворителях для этой цели [75].

Тонкий слой чистого вольфрама на медном катоде удастся получить из формамидного (с добавкой диметилформамида) раствора Na_2WO_4 при $i_k = 0,035\text{—}0,08 \text{ А/дм}^2$, а также из водно-диметилформамидного раствора этой соли [86, 87, 89].

Заключение

Наибольшее число работ по электроосаждению покрытий металлическим вольфрамом посвящено разработке составов и условий работы расплавленных солевых ванн. Эти исследования, выполненные в основном в Великобритании, Китае, России, США, Украине, Японии, проводятся в некоторых странах и в настоящее время. Перспективным представляется создание новых низкотемпературных расплавленных композиций. В то же время водных электролитов, из которых получать покрытия вольфрамом проще и дешевле, известно много меньше, что связано в том числе и с термодинамически обусловленным низким катодным выходом вольфрама по току. Однако возможности создания более эффективных водных электролитов вольфрамирания не исчерпаны, о чем свидетельствуют успешные работы по электрохимическому получению покрытий молибденом из высококонцентрированных ацетатных электролитов. Результаты исследований по разработке составов и технологий вольфрамирания из электролитов на основе органических растворителей и ионных жидкостей не столь значительны. Этому направлению гальванотехники целесообразно уделить больше внимания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеликман А. Н., Никитина Л. С. Вольфрам. — М.: Металлургия, 1978. 272 с.
2. Kamijima A., Ito S., Momotani H., Yoneda N. Tungsten coatings on iron, nickel, copper and stainless steel obtained by CVD method // J. metal finishing society Japan. 1988. V. 39. № 6. P. 315–322.
3. Королев Ю. М. Осаждение вольфрама восстановлением его гексафторида водородом при стехиометрическом соотношении компонентов — экологически чистый технологический процесс // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2015. № 1. С. 22–27.
4. Small L. J., Brumbach M. T., Clem P. G., Spoerke E. D. Deposition of tungsten metal by an immersion process // J. electrochemical society. 2017. V. 164. № 6. P. D269–D274.
5. Плотников А. В., Демьянов Б. Ф., Плотников В. А. Способ получения жаропрочного покрытия из вольфрама или тантала. Патент РФ № 2437960. Оpubл. 2011.
6. Khan A. A., Labbe J. C., Grimaud A., Fauchais P. Molybdenum and tungsten coatings for x-ray targets obtained through the low-pressure plasma spraying process // J. thermal spray technology. 1997. V. 6. P. 228–234.
7. Kobayashi A. Tungsten coating for thermal fusion material produced gas tunnel type plasma spraying // Transactions of JWRT. 2008. V. 37. № 1. P. 63–67.
8. Huang J., Wang F., Liu Y., Jiang S., Wang X., Qi B., Gao L. Properties of tungsten coating deposited onto copper by high-speed atmospheric plasma spraying // J. nuclear materials. 2011. V. 414. № 1. P. 8–11.

9. **Kim H. S., Hong B. G., Moon S. Y.** Thick tungsten layer coating on ferritic-martensitic steel without interlayer using a DC vacuum plasma spray and a RF low pressure plasma spray method // *Thin solid films*. 2017. V. 623. P. 59–64.
10. **Aghamir F. M., Momen-Baghdadabad A. R.** Characteristics of tungsten layer deposited on graphite substrate by a low energy plasma focus device at different angular position // *Thin solid films*. 2019. V. 685. P. 108–116.
11. **Васько А. Т., Шатурская В. П., Тоболич В. В., Семенченко И. Е.** Способ электрохимического осаждения вольфрама. Авт. свид. СССР № 425979. Оpubл. 1974.
12. **Dippel A.-C., Schneller T., Lehmann W., Reichenberg B., Waser R.** Tungsten coatings by chemical solution deposition for ceramic electrodes in fluorescent tube // *J. materials chemistry*. 2008. V. 18. № 29. P. 3501–3506.
13. **Ван-Лимпт И. А. М.** Способ покрытия тел вольфрамом посредством электролиза расплавленных солей. Патент СССР № 3568. Оpubл. 1928.
14. **Davis G. L., Gentry C. H. R.** The electrodeposition of tungsten // *Metallurgia: the British J. metals*. 1956. V. 53. P. 3–17.
15. **McCawley F. X., Kenahan C. B., Schlain D.** Preparation of thick coatings of tungsten. U. S. Department of the interior. Bureau of mines. 1964. № 6454.
16. **Mellors G. W., Senderoff S.** Electrodeposition of refractory metals. Canadian Patent № 688546. Issued 1964.
17. **Чижилов Д. М., Трусова В. Г., Пятакова М. И.** Хлоридно-карбонатный электролит для вольфрамирования // *Цветные металлы*. 1965. № 3. С. 49–53.
18. **Senderoff S., Mellors G. W.** Coherent coatings of refractory metals // *Science*. 1966. V. 153. № 3. P. 1475–1481.
19. **Senderoff S., Mellors G. W.** Electrodeposition of coherent deposits of refractory metals: VI. Mechanism of deposition of molybdenum and tungsten from fluoride melts // *J. electrochemical society*. 1967. V. 114. № 6. P. 586–587.
20. **Чижилов Д. М., Трусова В. Г., Пятакова М. И.** Способ нанесения вольфрамового покрытия электролизом из расплава. Авт. свид. СССР № 195279. Оpubл. 1967.
21. **Барабоскин А. Н., Перевозкин В. К., Пономарева З. С., Философова А. Б.** Структура вольфрамовых покрытий, полученных электролизом хлоридно-вольфрамовых расплавов // *Электрохимия расплавленных солевых и твердых электролитов*. Труды института электрохимии Уральского филиала АН СССР. 1968. № 11. С. 45–56.
22. **Mellors G. W., Senderoff S.** Electrodeposition of refractory metals. U. S. Patent № 3444058. Patented 1969.
23. **Вячеславов П. М., Грилихес С. Я., Буркат Г. К., Круглова Е. Г.** Гальванотехника благородных и редких металлов. — Л.: Машиностроение, 1970. 248 с.
24. **Барабоскин А. Н., Таланова М. И., Салтыкова Н. А., Мартемьянова З. С., Ксенофонтова Т. Б.** Влияние окиси кальция и некоторых примесей на структуру вольфрамовых покрытий, осажденных из хлоридно-вольфрамового расплава // *Электрохимия расплавленных солевых и твердых электролитов*. Труды института электрохимии Уральского филиала АН СССР. 1970. № 15. С. 60–66.
25. **Барабоскин А. Н., Салтыкова Н. А., Таланова М. И., Мартемьянова З. С.** Получение сплошных осадков вольфрама электролизом хлоридных расплавов // *Электрохимия расплавленных солевых и твердых электролитов*. Труды института электрохимии Уральского филиала АН СССР. 1970. № 15. С. 67–68.
26. **Шапвал В. И., Грищенко В. Ф., Пархоменко Н. И.** Электролит вольфрамирования. Авт. свид. СССР № 456853. Оpubл. 1975.
27. **Павловский В. А., Балихин В. С., Резниченко В. А., Доронькин Е. Д.** Электролит вольфрамирования. Авт. свид. СССР № 478889. Оpubл. 1975.
28. **Делимарский Ю. К., Грищенко В. Ф., Пархоменко Н. И.** Получение вольфрамовых покрытий электролизом оксихлоридных расплавов на основе эквимольной смеси KCl—NaCl // *Защита металлов*. 1976. Т. 12. № 6. С. 726–729.
29. **Барабоскин А. Н., Молчанов А. М., Мартемьянова З. С., Виноградов-Жабров О. Н.** Структура сплошных слоев вольфрама, электроосажденных из хлоридного расплава // *Исследование солевых расплавов и окисных систем*. Труды института электрохимии УНЦ АН СССР. 1976. № 23. С. 46–51.
30. **Молчанов А. М., Мартемьянова З. С., Кутергина Н. М.** Электроосаждение сплошных слоев вольфрама из хлоридных расплавов // *Ионные расплавы и твердые электролиты*. Труды института электрохимии УНЦ АН СССР. 1978. № 27. С. 22–25.
31. **Барабоскин А. И., Молчанов А. М., Виноградов-Жабров О. Н.** Способ получения вольфрамовых покрытий. Авт. свид. СССР № 647359. Оpubл. 1979.
32. **Барабоскин А. Н., Заборохин Л. Н., Косихин Л. Т., Бычин В. П.** Расплав для электроосаждения вольфрамовых покрытий. Авт. свид. СССР № 663764. Оpubл. 1979.

33. Делимарский Ю. К., Туманова Н. Х., Сарнавский Н. М., Таранишина К. М., Зайцева Л. Я., Святенко Т. В., Перекупко В. А. Расплав для электролитического вольфрамирания. Авт. свид. СССР № 827611. Оpubл. 1981.
34. Барабошкин А. Н., Молчанов А. М. Электролит вольфрамирания. Авт. свид. СССР № 834265. Оpubл. 1981.
35. Белов С. Ф., Игумнов М. С., Козлова В. А., Дробот Д. В., Ловчиновский И. Ю., Бушуев Ю. Г., Малышева Е. Б., Виноградова Л. В. Электролит вольфрамирания. Авт. свид. СССР № 865998. Оpubл. 1981.
36. Молчанов А. М., Барабошкин А. Н. Электролит вольфрамирания. Авт. свид. СССР № 1062315. Оpubл. 1983.
37. Бельный М. А., Иванов А. Ф. Электроосаждение металлических покрытий. Справочное издание. — М.: Металлургия, 1985. 288 с.
38. Ажогин Ф. Ф., Бельный М. А., Галль И. Е. и др. Гальванотехника. Справочное издание. — М.: Металлургия, 1987. 736 с.
39. Hayashi H., Hayashi N., Uno K., Takehara Z., Katagiri A. Electrodeposition of tungsten from ZnBr_2 – NaBr melts // Proceedings electrochemical society. 1987. V. 1987–7. № 1. P. 814–824.
40. Ito Y., Shimada T., Yabe H., Oishi J. Electrochemical reaction of WO_4^{2-} ion in LiCl – KCl eutectic melt // Proceedings electrochemical society. 1987. V. 1987–7. № 1. P. 825–834.
41. Katagiri A., Suzuki M., Takehara Z. Electrodeposition of tungsten in ZnBr_2 – NaBr and ZnCl_2 – NaCl melts // J. electrochemical society. 1991. V. 138. № 3. P. 767–773.
42. Stern K. H. Metallurgical and ceramical protective coatings. — London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: Charman & Hall. 1996. 341 p.
43. Koyama K., Morishita M., Umezumi T. Design of molten salt bath on the basis of acid-base cooperative reaction mechanism. Smooth electrodeposition of tungsten from KF – B_2O_3 – WO_3 molten salt // Electrochemistry. 1999. V. 57. № 6. P. 677–683.
44. Ma R., Zhou C., Li G., Wang C., Sun L. Tungsten electrodeposition in Na_2WO_4 – WO_3 – ZnO molten salts // Chinese J. nonferrous metals. 2000. V. 10. № 5. publ. 22.
45. Туманова Н. Х., Кочетова С. А., Буряк Н. И., Трифонова Т. В., Бойко А. О., Богданович Л. В. Электрохимия вольфрама в низкотемпературных карбамид-галогенидных расплавах // Украинский химический журнал. 2003. Т. 69. № 11–12. С. 37–40.
46. Malyshev V. V., Gab A. I., Astrelin I. M., Gaune-Escard M. Electrochemical study of sodium tungstate – sodium pyrosulfate melts and tungsten coatings electrodeposited from them // Molten salts XIV. Proceedings international symposium. The electrochemical society, inc. 2004. Proceedings Vol. 2004–24. P. 1027–1036.
47. Ускова Н. Н., Сарычев С. Ю., Глушаков В. Г., Дуда Т. И., Малышев В. В. Электрохимическое изучение расплавов вольфрамат натрия – пиросульфат натрия и осаждение из них вольфрамовых покрытий // Расплавы. 2005. № 5. С. 48–54.
48. Nakajima H., Nohira T., Hagiwara R. Electrodeposition of metallic tungsten in ZnCl_2 – NaCl – KCl – KF – WCl_4 melt at 250 °C // Electrochemical solid state letters. 2005. V. 8. № 7. P. C91–C94.
49. Павловский В. А. Структура электролитических вольфрамовых покрытий, полученных в оксидном расплаве галогенидов // Коррозия: материалы, защита. 2005. № 10. С. 29–32.
50. Молчанов А. М., Мартемьянова З. С., Калинин М. Г. Структура вольфрамовых осадков, электроосажденных из расплава NaCl – KCl – $\text{Na}_2\text{WO}_3\text{F}_3$ – K_2WCl_6 // Расплавы. 2005. № 5. С. 27–34.
51. Nakajima H., Nohira T., Hagiwara R., Nitta K., Inazawa S., Okada K. Electrodeposition of metallic tungsten films in ZnCl_2 – NaCl – KCl – KF – WO_3 melt at 250 °C // Electrochimica acta. 2007. V. 53. № 1. P. 24–27.
52. Nohira T., Nakajima H., Kitagawa K., Hagiwara R., Nitta K., Inazawa S., Okada K. Electrodeposition of refractory metals from some ZnCl_2 based molten salts at 150–250 °C // ECS transactions. 2007. V. 3. № 35. P. 333–340.
53. Nitta K., Nohira T., Hagiwara R., Majima M., Inazawa S. Characteristics of a tungsten film electrodeposited in a KF – B_2O_3 – WO_3 melt and preparation of W – Cu – W three-layered films for heat sink application // J. applied electrochemistry. 2010. V. 40. № 8. P. 1443–1448.
54. Малышев В. В., Габ А. И. Высокотемпературные гальванические покрытия молибдена и вольфрама и их карбидов из ионных расплавов, электроосаждение из галогенидно-оксидных и оксидных расплавов // Физикохимия поверхности защита металлов. 2011. Т. 47. № 5. С. 525–533.
55. Малышев В. В. Различные типы структур катодных осадков при электроосаждении вольфрама из ионных расплавов // Кристаллография. 2013. Т. 58. № 1. С. 120–127.
56. Ускова Н. Н., Малышев В. В., Косенко В. А., Стукота С. А., Ли Б. Влияние вольфрамового покрытия на электрохимическое и коррозионное поведение титана // Вісник КрНУ. 2014. вип. 6 (89). ч. 1. С. 178–182.
57. Jiang F., Zhang Y., Li X., Sun N., Wang L. Tungsten coating prepared on V-4Cr-4Ti alloy substrate by electrodeposition from molten salt in air atmosphere // Fusion engineering design. 2014. V. 89. № 2. P. 83–87.

58. **Jiang F., Zhang Y., Li X., Sun N., Wang L.** Effect of pulse parameter on preparation of W coating on V alloy // *Fusion engineering design*. 2014. V. 89. № 6. P. 818–825.
59. **Sun N., Zhang Y., Jiang F., Lang S., Xia M.** Preparation of tungsten coatings on graphite by electro-deposition via $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--WO}_3$ molten salt system // *Fusion engineering design*. 2014. V. 89. № 11. P. 2529–2533.
60. **Jiang F., Zhang Y. C.** Characterisation of tungsten coatings by pulsed current plating from molten salt in air atmosphere // *Transactions IMF*. 2014. V. 92. № 1. P. 59–64.
61. **Jiang F., Zhang Y., Sun N., Leng J.** Tungsten coating prepared on molybdenum substrate by electro-deposition from molten salt in air // *Applied surface science*. 2015. V. 327. P. 432–436.
62. **Jiang F., Zhang Y., Sun N., Leng J.** Effect of pulse current parameters on microstructure of tungsten coating electroplated from $\text{Na}_2\text{WO}_4 - \text{WO}_3 - \text{NaPO}_3$ // *Applied surface science*. 2015. V. 331. P. 278–284.
63. **Jiang F., Shao S., Wu H.** Effect of direct current density on performance of tungsten coating electroplated from $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--WO}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ system // *Fusion engineering design*. 2016. V. 106. P. 71–76.
64. **Jiang F.** Effect of cathodic current density on performance of tungsten coatings on molybdenum prepared by electrodeposition in molten salt // *Applied surface science*. 2016. V. 363. P. 389–394.
65. **Jiang F., Zhang Y.** Galvanic electrodeposition of thick tungsten coatings on CuCrZr alloy // *J. fusion energy*. 2016. V. 35. № 2. P. 281–288.
66. **Sun N., Lang S., Zhang Y., Xu Y., Liu H., Li G.** Properties of electrodeposited tungsten coatings on graphite substrates for plasma facing components // *J. fusion energy*. 2016. V. 35. № 4. P. 660–665.
67. **Малышев В. В., Ускова Н. Н., Габ А. И., Шахнин Д. Б., Куцевская Н. Ф.** Электроосаждение вольфрама из ионных расплавов: различные типы структур катодных осадков // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2016. № 49. С. 70–85.
68. **Malyshev V., Kushchevska N., Bagliuk G., Shakhnin D. B., Paprotskaya O., Zaliubovskiy M.** Electroplating with tungsten and tungsten-molybdenum alloys from metaphosphate-containing halide-oxide and oxide melts // *Machines technologies materials*. 2018. V. 12. № 10. P. 431–433.
69. **Qi Y., Tang Y., Wang B., Zhang M., Ren X., Li Y., Ma Y.** Characteristics of tungsten coatings deposited by molten salt electro-deposition and thermal fatigue properties of electrodeposited tungsten coatings // *International J. refractory metals hard materials*. 2019. V. 81. P. 183–188.
70. **Qin W., Xi X., Zhang Q., Zhang L., Ma L., Nie Z.** Study on properties of thin tungsten coatings prepared in Na_2WO_4 molten salt // *International J. electrochemical science*. 2019. V. 14. P. 10420–10430.
71. **Zhang Q., Xi X., Qin W., Zhang L., Ma L., Nie Z.** Study on preparation and properties of tungsten coating based on WC electrolysis // *International J. electrochemical science*. 2019. V. 14. P. 11092–11101.
72. **Габ А. И., Малышев В. В., Шахнин Д. Б., Брускова Д.-М. Я., Воляр Р. Н., Воденникова О. С., Карпенко А. В.** Физико-химические свойства высокотемпературных гальванических покрытий молибдена, вольфрама и их карбидов из ионных расплавов // *Металургія*. 2019. № 2 (40). С. 60–64.
73. **Jiang F., Zhang Y., Yang X., Huang K.** Thick tungsten coating obtained by pulse reverse electroplating from molten salt in atmosphere // *Materials research express*. 2019. V. 6. № 1. 016502.
74. **Woods C. J.** Electrochemical deposition of molybdenum and tungsten from trinuclear metal clusters ($\text{M}_3\text{O}_2(\text{OAc})_6(\text{H}_2\text{O})_3(\text{CF}_3\text{SO}_3)_2$) in 1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ionic liquid. Thesis Master Science. Wright state university, 2010.
75. **Fink C. G., Jones F. L.** The electrodeposition of tungsten from aqueous solutions // *Transactions electrochemical society*. 1931. V. 59. № 1. P. 461–481.
76. **Jones F. L.** The electrodeposition of tungsten from aqueous solutions. Columbia university. 1931. 24 p.
77. **Fink C. G.** Substantially pure tungsten plating and process for producing same. U. S. Patent № 1885702. Patented 1932.
78. **Yntena L. F.** The electrodeposition of chromium, molybdenum and tungsten // *J. American chemical society*. 1932. V. 54. № 9. P. 3775–3776.
79. **Райнес М. М.** Способ получения вольфрамовых покрытий на металлических поверхностях. Авт. свид. СССР № 50859. Оpubл. 1937.
80. **Theurer K.** The investigation of the electrolytic behavior of tungsten. D. Ph. Dissertation. Ohio state university. 1955.
81. **Inui T.** Study on tungsten plating by fluoride plating bath // *J. metal finishing Japan*. 1958. V. 19. № 12. P. 444–447.
82. **Бартл Д., Мудрох О.** Технология химической и электрохимической обработки поверхностей металлов. Пер. с чешск. – М.: Машгиз, 1961. 712 с.
83. **Иванова Н. Д., Кладницкая К. Б., Тарасенко Н. И., Городыский А. В.** Способ электролитического осаждения тугоплавких металлов и их сплавов. Авт. свид. СССР № 467144. Оpubл. 1975.
84. **Канчуковский О. П., Мороз Л. В.** Электролит вольфрамирания. Авт. свид. СССР № 1108138. Оpubл. 1984.
85. **Васько А. Т., Пацюк Ф. Н.** Электролит для осаждения покрытий из тугоплавких металлов и способ его приготовления. Авт. свид. СССР № 1123321. Оpubл. 1995.

86. **Левинскас А.** Электроосаждение вольфрама из водноорганических электролитов // Электрохимия. 1965. Т. 1. № 1. С. 37—43.
87. **Левинскас А.** Электроосаждение молибдена и вольфрама из формамидных растворов // Электрохимия. 1965. Т. 1. № 1. С. 115—117.
88. **Jajakrishnan S., Pushpavanam M., Sheno B. A.** Electrodeposition from organic solutions of metals that are difficult to deposit from aqueous solutions // Surface technology. 1981. V. 13. № 3. P. 225—240.
89. **Фиалков Ю. Я., Грищенко В. Ф.** Электровыделение металлов из неводных растворов. — Киев: Наукова думка, 1985. 240 с.
90. **Kim H., Lee J., Sohn I., Hwang T., Lee K.** Preparation of tungsten metal film by spin coating method // Korea-Australia rheology J.. 2002. V. 14. № 2. P. 71—76.

COMPOSITIONS FOR ELECTRODEPOSITION OF METALLIC TUNGSTEN COATINGS FROM MOLTEN SALT BATHS AND AQUEOUS SOLUTIONS (Review)

E. G. Afonin

Joint-Stock Company "Kaluga research institute of telemechanical devices", Kaluga, Russia

The aim of the article is to provide the review of papers and inventions on electro-deposition of metallic tungsten coatings obtained from ionic melts, aqueous solutions, ionic liquids and nonaqueous solutions: chemical compositions, some physicochemical and technological characteristics.

Keywords: tungsten coating, electrochemical deposition, molten salt electrolyte, aqueous electrolyte, ionic liquid, nonaqueous electrolyte.

Bibliography — 90 references.

Received August 13, 2020

УДК 629.78

СПОСОБ ВЫБОРА КОМПЛЕКТУЮЩИХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. П. Шовкалюк, канд. техн. наук

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

Представлен процесс проектирования космического аппарата (КА) в виде многостадийной интеграции элементов и их свойств в систему. Основой достижения проектных решений является иерархия параметров комплектующих частей технической системы. Определено, что конечные характеристики проектируемого КА могут быть двух видов: аддитивные и частично аддитивные. Для выбора комплектующих подсистем использованы комплексные показатели, рассчитанные суммированием относительных показателей сравнения (ОПС) параметров. Весомость параметров определена ранжированием в соответствии с критериями оптимизации спутников.

Ключевые слова: космический аппарат, системность, множество, ракетный двигатель, относительный показатель сравнения, ранжирование.

Проектирование КА осуществляют с использованием специальных методов, позволяющих согласовывать массогабаритные, энергетические, ресурсные и другие характеристики бортовых систем.

На первом этапе проектирования формируют эскизный вариант КА, выбирают комплектующие подсистемы и определяют структурные связи. Параметры подсистем могут меняться в широком диапазоне в зависимости от элементной базы, и их выбор, обеспечивающий оптимальные критерии системы в целом, может оказаться не всегда очевидным. Структурирование и построение системных связей требуют специального программного и методического обеспечения, позволяющего в кратчайшее время проводить комплексную оценку и выбор вариантов комплектации КА [1, 2].

Инженеры стремятся к увеличению доли автоматического проектирования. Цель работы — разработка способа принятия проектных решений по выбору оптимального набора комплектующих КА с учетом системных связей их параметров.

Теоретико-множественный анализ компонентов проектируемого КА

КА — это сложные технические конструкции, состоящие из большого количества составных частей. По этой причине концептуальное проек-

тирование требует четкого понимания системности КА — зависимости "генеральных" характеристик от структурной взаимосвязи комплектующих. Людвиг фон Берталанфи определял систему как комплекс взаимодействующих компонентов или как совокупность элементов, находящихся в определенных отношениях друг с другом и со средой [3]. Таким образом, с точки зрения теоретико-множественных представлений, КА — это структурированное множество элементов, объединенных функциональными связями:

$$M_{КА} \equiv \langle \mathcal{E}_i, R_i \rangle, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_i — элементы (части, компоненты);
 R_i — связи (отношения).

При рассмотрении КА как системы с иерархической структурой верхним организационным уровнем является он сам ($M_{КА}$). Следующий уровень представляет собой набор связанных подсистем ($M_{21}, M_{22}, M_{23}, M_{24}$), например целевая и служебная аппаратура, обеспечивающая выполнение рабочих задач и долговременное функционирование. В свою очередь, подсистемы состоят из элементов — систем условно нижнего организационного уровня ($M_{31}, M_{32}, M_{33}, M_{34}, M_{35}, M_{36}, M_{37}$) (рис. 1).

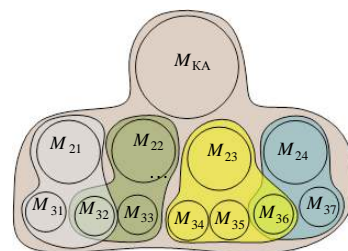


Рис. 1. Схема теоретико-множественного представления КА

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

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2020 г.

© Шовкалюк А. П., 2020

Описанную свертку множества комплектующих можно представить в следующем виде:

$$M_{KA} = \{M_{21} \cup M_{22} \cup M_{23} \cup M_{24}\} = \{M_{31} \cup M_{32} \cup M_{33} \cup M_{34} \cup M_{35} \cup M_{36} \cup M_{37}\}, \quad (2)$$

$$M_{21} \equiv M_{31} \cup M_{32}, R_{31-32},$$

$$M_{22} \equiv M_{32} \cup M_{33}, R_{32-33},$$

$$M_{23} \equiv M_{34} \cup M_{35} \cup M_{36}, R_{34-35-36},$$

$$M_{24} \equiv M_{36} \cup M_{37}, R_{36-37};$$

$$M_{KA} \equiv M_{21} \cup M_{22} \cup M_{23} \cup M_{24}, R_{21-22-23-24}. \quad (3)$$

В основе понимания свойств любой системы лежит не только количественный учет элементов и связей, но и учет их свойств [4]. Отсюда вытекает следующее определение КА: это сложная система, состоящая из множества интегрированных компонентов и их технических характеристик. Сложность проектирования технических объектов заключается в согласовании характеристик различных составных частей, как правило связанных между собой множеством уравнений различного типа, логических зависимостей, алгоритмических связей [5].

Теоретико-множественный анализ параметров проектируемого КА

С учетом параметров конструктивных элементов теоретико-множественное выражение КА (3) записывается следующим образом [6]:

$$M_{KA} \equiv \langle \mathcal{I}_i, Q_i, R_i \rangle, \quad (4)$$

где Q_i — интегративный параметр системы:

$$Q_i = \{Q_{21} \cup Q_{22} \cup Q_{23} \cup Q_{24}\} = \{Q_{31} \cup Q_{32} \cup Q_{33} \cup Q_{34} \cup Q_{35} \cup Q_{36} \cup Q_{37}\}. \quad (5)$$

Параметры могут быть аддитивными, когда величина складывается из свойств элементов (масса, стоимость), или частично аддитивными, когда величина зависит от структурных связей (надежность, габариты). Например, состав наноспутника определяет его массовое уравнение, которое можно представить в виде суммы масс системы энергетического обеспечения (СЭО), системы обеспечения теплового режима (СОТР), бортового комплекса управления (БКУ), служебных подсистем (СП) и систем, предназначенных для обеспечения работы полезной нагрузки (ПН) [7]:

$$Q_{MСП} = \{Q_{СЭО} \cup Q_{СОТР} \cup Q_{БКУ} \cup Q_{НК} \cup Q_{ПН}\},$$

или

$$M_{СП} = M_{СЭО} + M_{СОТР} + M_{БКУ} + M_{НК} + M_{ПН}.$$

Величину структурозависящего параметра системы (надежность) можно рассчитать только с учетом связей:

$$Q_{HKA} \equiv Q_{H21} \cup Q_{H22} \cup Q_{H23} \cup Q_{H24}, R_{21-22-23-24}.$$

С точки зрения теории надежности подсистемы КА соединены последовательно и их отказы статистически независимы. Отказ одной из подсистем приведет к отказу системы в целом (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема подсистем с последовательным соединением

Вероятность безотказной работы системы на данном уровне интеграции определяется как [8]

$$P_{\text{сис}} = \prod_{i=1}^n P_{\text{под}i}, \quad (6)$$

где n — число подсистем;

P_i — вероятность безотказной работы i -й подсистемы.

Элементы в подсистемах могут быть соединены как последовательно, так и параллельно (рис. 3). В случае параллельного соединения отказ наступает при отказе всех элементов. Безотказность $P_{\text{под}}$ подсистем определяется как [8]

$$P_{\text{под}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\mathcal{I}i}), \quad (7)$$

где n — число элементов;

$P_{\mathcal{I}i}$ — безотказность i -го элемента или подсистемы.

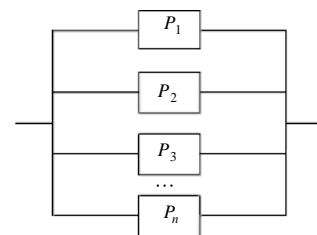


Рис. 3. Блок-схема элементов системы с параллельным соединением

Соответственно безотказность всей системы $P_{\text{сис}}$ определяется как

$$P_{\text{сис}} = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\mathcal{I}i}) \right]. \quad (8)$$

Из изложенного следует, что в основе проектирования КА будет лежать выстраивание иерархии комплектующих и их параметров (рис. 4) в целях достижения критериев $Q_{KA1} \geq x$, $Q_{KA2} \leq y$, $Q_{KA3} \geq z$ и т. д., где x, y, z — идеализированная величина критериев.

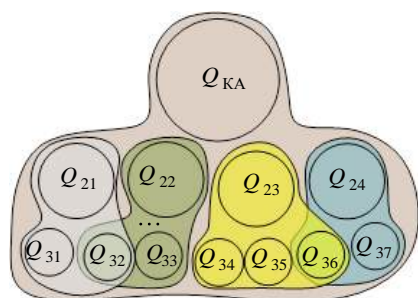


Рис. 4. Схема теоретико-множественного представления иерархии параметров

Выбор ракетного двигателя на основе относительного оценивания

Параметры различных подсистем КА могут меняться в широком диапазоне, а их выбор, обеспечивающий достижение конечных критериев, может оказаться не всегда очевидным.

В основе способа выбора комплектующих можно использовать ОПС, представляющие собой соотношения одноименных абсолютных параметров, характеризующих разные модели двигателей:

$$\text{ОПС} = \frac{I - \text{й параметр модели № 1}}{I - \text{й параметр модели № 2}}. \quad (9)$$

В качестве примера для выбора ракетного двухкомпонентного двигателя малой тяги (ДРДМТ), предназначенного для перемещения КА в космическом пространстве, за исходные данные взяты четыре параметра (табл. 1).

Таблица 1

Сводная информация о ДРДМТ "НИИМаш" [9]

Модель	Тяга, Н	Длина, мм	Масса, кг	Ресурс по включению	Внешний вид
11Д428А	130,5	274	1,5	500 000	
11Д458М	392,4	467	3	10 000	
17Д16	196,1	360	6,3	40 000	
17Д58Э	13,3	137	0,55	450 000	
РДМТ10	12	164	0,35	450 000	
РДМТ3	3	127	0,31	450 000	
РДМТ50М	54	253,1	1,3	100 000	

Для каждого параметра выбрано наилучшее значение, принятое за единицу. Остальные значения представлены ОПС, которые отображают степень ухудшения значения по сравнению с наилучшим (табл. 2).

Таблица 2
Относительные показатели и ранг

Модель	Тяга, Н	Длина, мм	Масса, кг	Ресурс по включению
11Д428А	0,33	0,46	0,21	1
11Д458М	1	0,27	0,1	0,02
17Д16	0,5	0,35	0,05	0,08
17Д58Э	0,034	0,93	0,56	0,9
РДМТ10	0,031	0,77	0,88	0,9
РДМТ3	0,007	1	1	0,9
РДМТ50М	0,14	0,5	0,24	0,2
РАНГ	2	3	1	4

Степень влияния различных показателей при формировании обобщенной оценки эффективности учитывается с помощью ранжирования. Для этого в табл. 2 введена строка "Ранг". Ранг определяют в соответствии с иерархией оптимизационных критериев для спутников [10].

Затем ОПС делят на ранг и суммируют. Наибольшему суммарному показателю соответствует оптимальная модель ДРДМТ (табл. 3).

Расчеты по предлагаемому способу показали, что наилучшим вариантом для проектируемого КА будет двигатель модели РДМТ3. Его комплексный показатель равен 1,56. Данный метод чувствителен к анализируемым параметрам и ранжированию. Если добавить параметр или поменять ранги, результат выбора может кардинально измениться.

Заключение

Процесс проектирования КА можно представить в виде многостадийной интеграции элементов и их свойств в подсистемы вплоть до интеграции в систему с требуемыми параметрами. В связи с этим, способ принятия проектных решений по выбору оптимального набора комплектующих КА должен основываться на иерархической структуре системных связей и их параметров. Проблема выбора комплектующих частей и согласования их с конечными критериями КА эффективно решается путем применения ОПС.

Расчетная таблица показателей

Таблица 3

Модель	Тяга, Н	Длина, мм	Масса, кг	Ресурс по включению	Суммарный показатель
11Д428А	0,165	0,153	0,21	0,25	0,78
11Д458М	0,5	0,090	0,1	0,005	0,70
17Д16	0,25	0,117	0,05	0,02	0,44
17Д58Э	0,017	0,310	0,56	0,225	1,11
РДМТ10	0,016	0,257	0,88	0,225	1,38
РДМТ3	0,004	0,333	1	0,225	1,56
РДМТ50М	0,07	0,167	0,24	0,05	0,53

ЛИТЕРАТУРА

1. Бронев С. А., Курбатов Е. М., Авласко П. В., Поваляев В. А. Электромеханические системы космических аппаратов и автоматизация их проектирования // Журнал Сибирского федерального ун-та. Техника и технологии. 2012. № 5. С. 191—204.
2. Анкудинов А. В., Тестоедов Н. А., Легалов А. И., Ледяев Д. Н. Анализ и инструментальное обеспечение вариантного проектирования космических аппаратов. Проектирование и производство летательных аппаратов, космические исследования и проекты. Решетневские чтения, 2009. С. 14—15.
3. Л. фон Берталанфи. Общая теория систем: критический обзор: сб. переводов "Исследования по общей теории систем". — М.: Прогресс, 1969. С. 23—82.
4. Systems, Self-Organization and Information. Selection and editorial matter, Alfredo Pereira Jr., William Alfred Pickering, and Ricardo Ribeiro Gudwin. 2019. — 238 p.

5. Кучеров А. С., Куренков В. И., Белкин В. Б., Алиппа В. С. Проблемно-ориентированные системы в задачах проектирования космических аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 2. С. 145—153.
6. Холл А. Опыт методологии для системотехники. — М.: Сов. радио, 1975. — 448 с.
7. Малыгин Д. В. Методика проектирования сверхмалых космических аппаратов. Решетневские чтения, 2014. С. 504, 505.
8. Вайнштейн И. И. Процессы и стратегии восстановления с изменяющимися функциями распределения в теории надежности. — Красноярск: СФУ, 2016. — 189 с.
9. <http://www.niimashspace.ru>
10. Литвинов А. В., Лядова Е. Ф., Рыбка И. В. Вопросы проектирования космических аппаратов спутниковой системы связи // Инновационная наука. 2020. № 4. С. 43—49.

METHOD FOR SELECTING COMPONENTS FOR SPACECRAFT SYSTEMS

A. P. Shovkalyuk

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

In this work, the process of designing a spacecraft (SC) is presented in the form of a multistage integration of elements and their properties into the system. The basis for achieving design solutions is the hierarchy of parameters of the component parts of the technical system. It has been determined that the final characteristics of the spacecraft being designed can be of two types: additive and partially additive. To select the components of the subsystems, complex indicators are used, calculated by summing the relative comparison indicators (OPS) of the parameters. The weight of the parameters is determined by ranking in accordance with the satellite optimization criteria.

Keywords: spacecraft, consistency, set, rocket engine, relative comparison indicator, ranking.

Bibliography — 10 references.

Received September 22, 2020

УДК 623.09

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОРОННИМИ ПРЕДМЕТАМИ

А. М. Потоцкая

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

Рассмотрена проблема защиты авиационного газотурбинного двигателя от попадания в газозвдушной тракт посторонних предметов на этапе взлета и посадки. Проанализированы причины попадания посторонних предметов, их размеры и масса. Предложена "система сдувом вихревого жгута" для защиты газотурбинного двигателя от попадания посторонних предметов.

Ключевые слова: посторонние предметы, досрочное снятие двигателей.

Интенсивное использование авиационной техники может сопровождаться взлетами и посадками с неподготовленных аэродромов с малыми размерами взлетно-посадочной полосы (ВПП), в том числе с грунтовых. Это приводит к досрочному съему двигателей с самолетов из-за повреждения лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) посторонними предметами (ПП), попавшими с воздушным потоком в двигатель с поверхности неподготовленных аэродромов. Досрочное снятие двигателей влечет за собой снижение боеготовности частей ВВС, простой самолетов, нарушение планов перевозок грузов и материальных средств, сопровождается значительными материальными затратами на ремонт и восстановление двигателей. Попадание ПП приводит к появлению царапин, забоин, вмятин, деформации лопаток компрессора и даже к разрушению, что в первую очередь сказывается на безопасности полетов [1].

Вопросы уменьшения количества двигателей, досрочно снимаемых с эксплуатации из-за конструктивно-производственных недостатков, ошибок летного и инженерно-технического состава, повреждения деталей газозвдушного тракта посторонними предметами, попадающими в двигатель, возникли еще с началом эксплуатации ГТД. Досрочный съем двигателей ведет к большим экономическим потерям, простоям авиационной техники из-за внеплановых замен ГТД, что отрицательно сказывается на функционировании авиационных организаций [2].

Для большинства типов двигателей основной причиной досрочного снятия с эксплуатации

остаются конструктивно-производственные недостатки (КПН). Перечень КПН, приводящих к досрочному снятию двигателей с эксплуатации, в течение последних лет практически неизменен. Причины их возникновения и характер проявления подробно исследованы. Определено их влияние на параметры двигателя при различных стадиях развития. Все это объясняется недостаточной эффективностью мероприятий промышленности, направленных на устранение конструктивно-производственных недостатков.

Другой причиной досрочного снятия двигателей (ДСД) с эксплуатации, имеющей массовый характер, является попадание на вход двигателей посторонних предметов с поверхности аэродромов. По статистике из-за повреждения элементов газозвдушного тракта посторонними предметами снимают 13 % двигателей от общего числа ДСД. Такое положение дел объясняется низким качеством и плохой подготовкой к полетам поверхности аэродромов, нарушениями правил руления и взлета самолетов, отсутствием или недостаточной эффективностью систем защиты двигателей от попадания посторонних предметов.

Причины попадания посторонних предметов в двигатель

Для разработки мероприятий по защите двигателя от повреждения посторонними предметами необходимо знать пути и причины их попадания в силовую установку, параметры посторонних предметов. Опыт эксплуатации показывает, что основными причинами являются:

- вихревой заброс посторонних предметов на вход в воздухозаборник силовой установки (СУ);
- подброс ПП устройствами реверса тяги;
- заброс ПП из-под колес стоек шасси, расположенных в зоне подсоса воздуха;

Потоцкая Анастасия Михайловна, студентка.
E-mail: Nastya182-96@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2020 г.

© Потоцкая А. М., 2020

- заброс ПП реактивными струями впереди рулящих или взлетающих самолетов.

Основными источниками ПП являются:

- разрушение аэродромных покрытий в процессе эксплуатации по климатическим причинам;
- нарушение технологии при строительстве аэродромных покрытий;
- занос ПП ветром, средствами наземного обслуживания (СНО).

Анализ характеристик посторонних предметов, проведенный на аэродромах ВВС, расположенных в различных районах СНГ с различными атмосферно-климатическими условиями, показал, что в каждую летную смену после подготовки аэродромов к полетам с помощью СНО на ВПП и рулевых дорожках (РД) остаются ПП в количестве от 25 до 435 шт. общей массой от 78 до 946 г. Из всех обнаруженных ПП 69,1 % являются "опасными" для лопаток ГТД. Это те частицы, минимальная масса которых превышает 0,2 г для гранита и металлических предметов и 2 г для бетонных крошек, битума и т. п. [3].

Относительная частота появления ПП для всех исследуемых аэродромов по типам (рис. 1) имеет следующие значения:

- битум 40,8 %;
- камни (гравий) 34,2 %;
- бетон 20,8 %;
- прочие ПП 4,2 %.

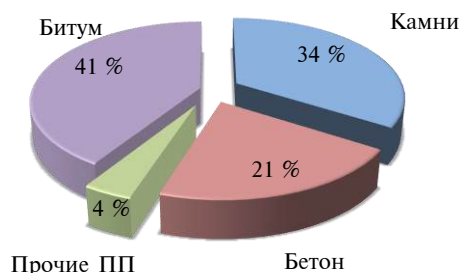


Рис. 1. Частота появления ПП

Большая часть ПП, находящихся на аэродроме, имеет размеры менее 15 мм. Данные о размерах и частоте появления ПП приведены в таблице [3].

Размеры и частота появления ПП на ВПП и РД

Размеры ПП, мм	Частота появления ПП различных типов, % от общего числа ПП		
	Камни	Бетон	Битум
4	10	39	44
4—5	7	11	6
5—7	17	24	17
7—10	26	16	15
10—15	22	7,5	13
15—20	7	1,5	3,5
20—25	7	1	1,2
25	4	0	0,3

Результаты обработки экспериментальных исследований по характеру расположения ПП на поверхности аэродрома приведены на рис. 2 [3].

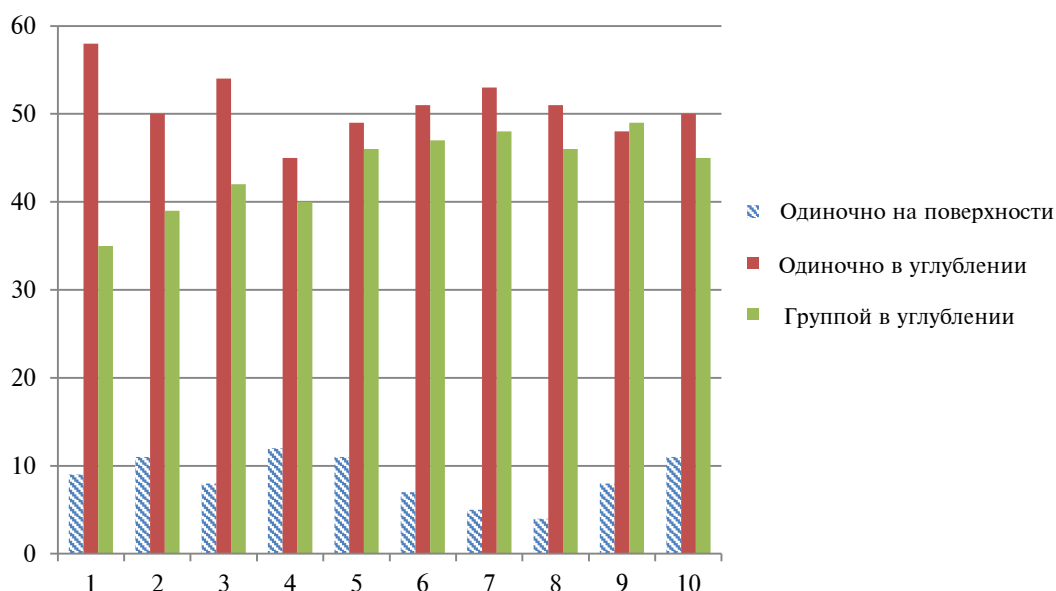


Рис. 2. Характер расположения ПП на поверхности аэродрома

Анализ характера расположения ПП показывает, что наиболее часто они располагаются одиночно в углублении. Важно отметить, что ПП, находящиеся в углублении, с наибольшей вероятностью захватываются вихревым жгутом.

Анализ направлений защиты ГТД от попадания посторонних предметов

Актуальность вопросов снижения досрочного схода двигателей с эксплуатации требует разработки направлений и устройств защиты как двигателя в целом, так и лопаток компрессора как одного из элементов конструкции, наименее стойкого к повреждениям.

Как показала практика использования универсальных средств защиты, например сплошной сетки, устанавливаемой в канале воздухозаборника самолета Су-27, при кажущейся возможности обеспечения полной очистки воздуха, поступающего в двигатель, решить проблему не удалось. В двигатель продолжали поступать ПП. Кроме того, остро встала проблема обледенения решетки, что не позволяет использовать данное устройство в любых атмосферных условиях: при обледенении защитное устройство разрушается и выводит двигатель из строя.

Среди универсальных средств защиты рядом преимуществ обладает жалюзийно-сетчатый сепаратор. Он может быть установлен на большинстве типов самолетов оперативно-тактической авиации, имеющих длинные воздухоподводящие каналы.

Для повышения защищенности СУ от посторонних предметов применяют струйные системы защиты, основанные на выдуве струи сжатого воздуха в область существования вихря. Данные системы защиты позволяют повысить защищенность СУ от попадания ПП при минимальных изменениях конструкции двигателя самолета.

Система управления "сдувом вихревого жгута"

Опыт использования сравнительно удачных (как на самолете ИЛ-86) струйных систем защиты и анализ результатов исследований их эффективности, проведенных в ЦАГИ и ряде авиационных НИИ, позволяют предположить, что возможности струйных систем далеко не исчерпаны, и существуют реальные способы повышения их эффективности. Согласно исследованиям, импульсные струйные системы разрушения вихревых течений на входе в воздухозаборник ГТД обладают более высокой эффективностью, чем существующие струйные системы других типов.

Отбор воздуха на сдув вихря производится системой отбора воздуха для нужд двигателя и систем самолета. Магистраль отбора воздуха на струйную систему защиты (ССЗ) выполнена совместно с магистралью противообледенительной системы (ПОС) и включает распределительное устройство, заслонку, патрубки и трубопроводы (рис. 3).

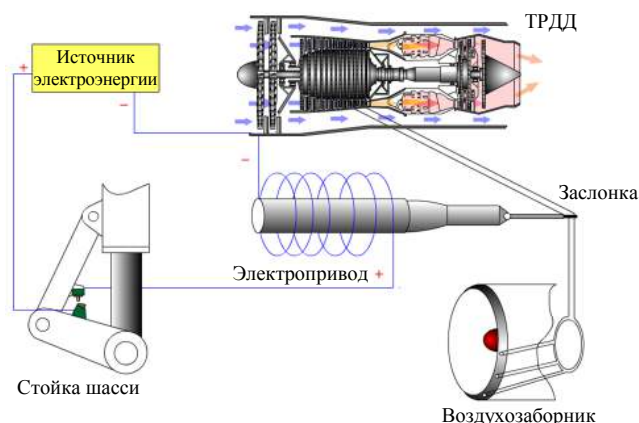


Рис. 3. Принципиальная схема системы управления "сдувом вихревого жгута"

Отбор воздуха производят из-за седьмой ступени компрессора высокого давления (КВД) от соответствующих фланцев на корпусе перепуска воздуха КВД и на диффузоре камеры сгорания (рис. 4). К фланцам подсоединены два патрубка, по которым воздух подают к распределительному устройству, а от него одним общим трубопроводом выводят наружу через стойку-обтекатель с левой стороны двигателя.

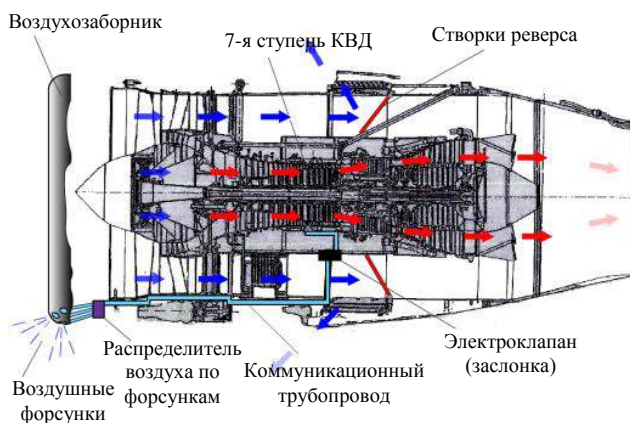


Рис. 4. Схема отбора воздуха (Двигатель ПС-90)

Линия отбора воздуха на ССЗ имеет систему формирования струй воздуха, которая состоит из следующих блоков:

- управления (выполняет функцию включения и выключения ССЗ);

- распределения воздуха по контурам (включает электромагнитное реле, которое обеспечивает включение контуров в работу по заданному закону);

- форсунок (обеспечивает выдув струй воздуха в заданных направлениях по заданным углам).

Выводы

Основными путями и направлениями защиты двигателя от попадания ПП являются эксплуатационные мероприятия, предотвращение попа-

дания ПП на входе в воздухозаборник, сепарация ПП из воздушного потока в канале воздухозаборника, повышение самозащищенности двигателя. Согласно экспертной оценке "система сдувом вихревого жгута" является эффективной и не требует значительных финансовых затрат за счет отсутствия встроенных сеток и экранов, которые не дают должной защиты ГТД от попадания посторонних предметов. Большим достоинством системы является продуманность функционирования: система работает только тогда, когда самолет находится на ВПП, вследствие чего не мешает работе самого двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Комов А. А.** О необходимости модернизации самолета ИЛ-76МД-90А // Изв. Самарского научного центра РАН. 2016. № 4(3). С. 592—596. <https://cyberleninka.ru/article/n/o-neobhodimosti-modernizatsii-samoleta-il-76md-90a>

2. **Белоусов М. Г.** Основные факторы, влияющие на повреждаемость лопаток компрессора авиационных двигателей посторонними предметами // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-factory-vliyayushchie-na-povrezhdaemost-lopatok-kompressorov-aviatsionnyh-dvigatelay-postoronnimi-predmetami/viewer>

3. **Комов А. А., Белоусов Г. Г.** Основные закономерности повреждения лопаток компрессоров авиационных ГТД посторонними предметами // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. № 134. С. 25—34. <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-zakonornosti-povrezhdeniya-lopatok-kompressorov-aviatsionnyh-gtd-postoronnimi-predmetami/viewer>

WAY TO SOLVING THE PROBLEM OF DAMAGE GAS TURBINE ENGINES BY EXTRANEIOUS OBJECTS

A. M. Pototskaya

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

The article reviews the problem of protecting an aircraft gas turbine engine from extraneous objects entering the gas-air flow duct during take-off and landing. This article considers the reasons for the ingress of extraneous objects and also analyzes their size and weight. A "vortex core blow-off system" is proposed to protect the gas turbine engine from the ingress of extraneous objects.

Keywords: extraneous objects, prematurely dismantling of engine.

Bibliography — 3 references.

Received September 9, 2020

УДК 681.7

ТЕХНОЛОГИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ В ГИПЕРЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

В. В. Кабаков

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

Исследованы волоконно-оптические технологии и приведены эмпирические зависимости преимуществ использования волоконно-оптических датчиков в аэрокосмической технологии.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, гиперзвуковая аэродинамическая труба, жесткая среда, космические технологии, брэгговская решетка.

Волоконно-оптические датчики стали центром исследования в области сенсорных технологий благодаря своим многочисленным преимуществам (компактность, малый вес, высокая чувствительность, мультиплексирование, антиэлектромагнитные помехи и легкость использования).

Цель работы — исследовать область технологии волоконно-оптического зондирования, уделяя особое внимание волоконным брэгговским решеткам и волоконно-оптическим датчикам, работающим в гиперзвуковой среде аэродинамической трубы. Задачи исследования включают анализ истории развития волоконно-оптических датчиков, выделение их преимуществ для космических технологий эмпирическим путем [1].

На ранней стадии волоконно-оптические датчики с модуляцией интенсивности опередили оптические технологии [1]. К концу 1980-х гг. с изобретением волоконно-брэгговских решеток технология оптического распознавания стала центром исследований, технология интерференционного волоконно-оптического распознавания развивалась быстрыми темпами.

После 2000 г. становятся доступными оптоволоконные сенсорные системы с очень быстрым откликом, с частотами считывания более 100 кГц, что позволяет оптоволоконным сенсорам работать в качестве датчиков статической и динамической нагрузки. Это означает, что оптоволоконные датчики вступили в новую практическую стадию. Вслед за развитием индустрии волоконно-оптических коммуникаций технологии оптического считывания стали еще одной крупной отраслью оптоэлектронных технологий [2, 3].

Кабаков Виталий Валериевич, заместитель начальника кафедры РВСН ВУЦ.
E-mail: ser-kvv73@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2020 г.

© Кабаков В. В., 2020

Волоконно-оптические датчики имеют следующие характеристики: компактность, малый вес и низкое энергопотребление, адаптация к требованиям приложений в жестких условиях. Среда, в которой используют оптоволоконные датчики, является относительно жесткой. Надежность и длительный срок службы становятся необходимостью. Например, в некоторых военных областях датчики должны быть надежными в течение длительного времени использования (обычно более 10 или даже 20 лет).

Интерферометрический волоконно-оптический датчик Fabry—Perot Interferometric

Волоконно-оптические датчики могут быть классифицированы на волоконно-оптические датчики Fabry—Perot (ВОД) и волоконно-оптические датчики Extrinsic Fabry—Perot Interferometric (ИВОД) в соответствии с их структурой.

Внутренняя часть интерферометрического волоконно-оптического датчика состоит из секции оптического волокна и двух зеркал на обоих концах этого волокна (рис. 1, а). Резонатор внутри интерферометрического волоконно-оптического датчика состоит из двух зеркал (рис. 1, б). Зеркало в оптоволоконном датчике обычно имеет низкую отражательную способность [4].

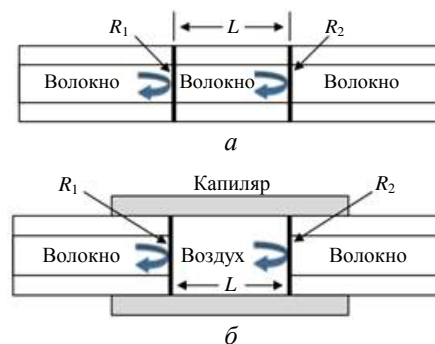


Рис. 1. Базовая структура резонаторов внутренних (а) и внешних (б) оптоволоконных датчиков

Отражение Френеля составляет около $R \approx 4,0 \%$ между торцом волокна и воздухом, где измеряется обратно отраженный свет. Следовательно, обнаруженный сигнал помехи приблизительно равен сигналу косинусного типа двухлучевой помехи.

Если пренебречь чрезмерными потерями, то интенсивность I_r отраженного от волоконно-оптического датчика света зависит от расстояния L между двумя отражающими поверхностями в соответствии с функцией Эйри[4]:

$$I_r = \frac{4R \sin^2 \left(\frac{2\pi L}{\lambda} \right)}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \left(\frac{2\pi L}{\lambda} \right)} I_i, \quad (1)$$

где R — отражательная способность зеркал;
 λ , I_i — длина волны и интенсивность падающего света соответственно.

Пучок света от источника распространяется в полость датчика вдоль входного или выходного волокна, часть падающего света отражается на торце входного или выходного волокна, образуя первый опорный луч с оптической интенсивностью $I_{1r} \approx (4 \%) I_i$, поскольку отражательная способность $R \approx 4 \%$ [4].

Большая часть света проходит через полость датчика, а затем отражается обратно, создавая второй опорный луч ($I_{2r} \approx (3,69 \%) I_i$). При трехкратном отражении интенсивность света $I_{3r} (\approx (0,15 \%) I_i)$ намного ниже, чем при первом, поэтому эффектом от I_{3r} можно пренебречь. Это означает, что достаточно рассмотреть только два отраженных луча. Таким образом, уравнение (1) может быть упрощено до следующего вида [5]:

$$I_r = 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi L}{\lambda} \right) \right] I_i.$$

Длина волны волоконно-оптического датчика отраженного интерференционного света λ в основном зависит от упруго-оптического эффекта и термооптического эффекта, связанных уравнением [6]

$$\lambda = \lambda_{\text{пер}} + \Delta\lambda_l + \Delta\lambda_T, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_l &= 2L\varepsilon; \\ \Delta\lambda_T &= n \frac{L}{\lambda} \frac{\Delta T}{\Delta L}; \end{aligned}$$

$\lambda_{\text{пер}}$ — исходная длина волны;

ε , n , ΔL , ΔT — деформация, отражательная способность волокна, изменение длины полости и изменение температуры соответственно.

Для волоконно-оптического датчика кривая спектра отраженного света, а также результат, полученный на основе уравнения (2), показаны на рис. 2.

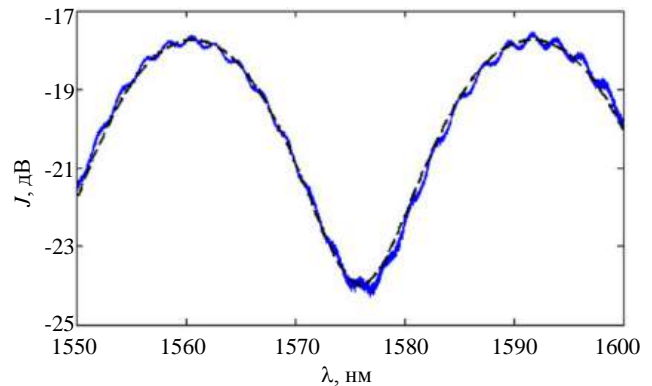


Рис. 2. Спектр отраженного света оптоволоконного датчика:

— измеренный; ---- — идеальный

Приведенные уравнения показывают, что волоконно-оптические датчики можно использовать для измерения нескольких параметров: температуры, напряжения и давления. Поскольку волоконно-оптические датчики используют изменение длины полости для определения внешних параметров, длина чувствительного элемента зависит от фактических эксплуатационных требований, варьируясь от нескольких до сотен микрон, что способно удовлетворить различные требования к измерениям, такие, как высокое пространственное разрешение, компактность и высокая чувствительность [6].

В 1988 г. Ли, Тейлор и др. сообщили о создании волоконно-оптических датчиков [6]. В 1991 г. Мерфи и др. сообщили о деформационных волоконно-оптических датчиках. Ученые проверяли усталостные свойства фюзеляжа истребителя F15 следующим образом: вставляли волокно в квази-прямую капиллярную трубку и затем прикрепляли их к фюзеляжу с помощью эпоксидной смолы.

В том же году ученые, создавая волоконный датчик давления и температуры, подходящий для медицинской области, использовали кремниевую диафрагму в качестве зеркала и чувствительного к давлению элемента [7]. С 2000 г. исследователи разработали несколько волоконно-оптических датчиков, применяя лазерную сварку, дуговую сварку, микрообработку, что делает волоконно-оптические датчики более надежными и стабильными в течение длительного времени. Волоконно-оптические датчики широко применяли для измерения давления, температуры и напряжения в таких условиях, как нефтяные скважины, динамическое давление в га-

зотурбинном двигателе и трансформаторе с высоким напряжением и мощностью, а также давление элемента, имплантированного в человеческое тело, и т. д. [7, 8].

В Технологическом институте Пекина (Китай) [22] продемонстрировали миниатюрный волоконно-оптический датчик, работающий до 500 °С. В Университете науки и техники Китая [23, 24] изготовили встроенный волоконно-оптический датчик деформации, работающий в диапазоне температур от 20 до 800 °С, с помощью лазерной микрообработки 157 нм [8].

Волоконная брэгговская решетка и волоконно-оптические датчики

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) является одним из дополнительных элементов оптического волокна. Используя фоточувствительность оптического волокна (внешний падающий фотон и ион германия взаимодействуют друг с другом, что приводит к постоянному изменению показателя преломления), ВБР устанавливает просторную фазовую решетку внутри центральной части волокна, период и амплитуда модуляции преломления которой являются константами [9] (рис. 3).

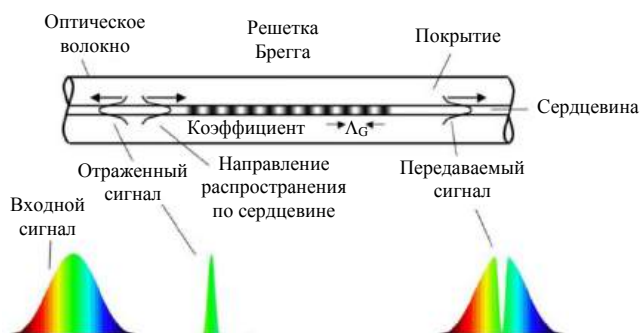


Рис. 3. Принципиальная схема работы волоконно-оптических датчиков ВБР

Период решетки обычно меньше 1 мкм, а показатель преломления сердцевинки волокна изменяется в соответствии с уравнением

$$\Delta n = \bar{\delta} n \left[1 - \nu \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} \right) z \right], \quad (3)$$

где $\bar{\delta} n$ — среднее значение роста показателя преломления сердцевинки волокна;
 ν — коэффициент модуляции показателя преломления ($0 \leq \nu \leq 1$);
 Λ — период равномерной решетки;
 z — координата положения волоконной решетки в осевом направлении [9].

Если условия фазового синхронизма выполнены, то длина решетки брэгговской волны равна

$$\Delta \lambda_B = 2n_{\text{эф}} \Lambda, \quad (4)$$

где λ_B — длина волны Брэгга;

$n_{\text{эф}}$ — эффективный показатель преломления оптического волокна.

Как один из отражательных фильтров с отличными характеристиками брэгговская решетка имеет отражательную способность до 100 %, а ее ширину полосы отражения и отражательную способность контролируют путем изменения условий записи в соответствии с необходимостью. Кроме того, центральная длина волны отраженного света изменяется в зависимости от температуры и давления снаружи, а соотношение между температурой и деформацией имеет вид [10]

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi) \Delta T + (1 - P_c) \Delta \varepsilon, \quad (5)$$

где $\alpha_f = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ — коэффициент термического расширения оптических волокон;

$\xi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ — термооптический коэффициент оптического волокна;

$P_c = -\frac{1}{n} \frac{d\varepsilon}{dT}$ — эластично-оптический коэффициент оптического волокна.

Результаты

Благодаря соответствующей чувствительной структуре волоконно-оптические датчики ВБР могут измерять различные параметры, такие, как температура, напряжение и давление. Длину волны в середине отраженного спектра волоконной решетки называют пиковой длиной волны, поскольку отраженный спектр волоконной решетки является симметричным с максимальной отражательной способностью на центральной длине волны. Кроме того, напряжение и температура могут нивелировать длину волны волоконной решетки. Другими словами, чем выше температура деформации, тем больше средняя длина волны. Что касается волоконной решетки, работающей в полосе 1550 нм, центральная длина волны имеет температурный коэффициент приблизительно 10 пм/°С и коэффициент деформации приблизительно 1,2 пм/мкм [11].

Заключение

Датчики ВБР применяют во многих областях, таких, как мониторинг состояния мостов, определение высокой температуры и высокого давления в нефтяных скважинах и для сейсмического обнаружения [11, 12].

По сравнению с традиционными электро-механическими или электронными датчиками волоконно-оптические датчики имеют относительно высокий потенциал для работы в гиперзвуковой аэродинамической трубе [13, 14]. Технологии гиперзвуковых экспериментов в аэродинамической трубе затрагивают такие вопросы, как аэродинамические силы, аэротермодинамика и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квант. электроника. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085—1103.
2. Середа П. В. Прецизионное определение параметров волоконных брэгговских решеток. Дисс... канд. техн. наук. — СПб, 2005. С. 189.
3. Беспрозванных В. Г., Гребенщикова Е. Н., Зырянов С. В., Оглезнев А. А. Экспериментальные характеристики волоконных брэгговских решеток с собственной анизотропией // Сб. научн. тр. SWorld. 2014. Т. 2. Вып. 1. С. 51—55.
4. Рао Я. Дж. Последние достижения в области волоконно-оптических внешних интерферометрических датчиков Фабри-Перо // Опт. фибер. технол. 2006. № 12(3). С. 227—237.
5. Варжель С. В., Куликов А. В., Брунов В. С. Метод понижения коэффициента отражения волоконных брэгговских решеток с помощью эффекта фотохромизма // Научно-технический вестник ИТМО. 2020. С. 24—36.
6. Тсай В., Линь С. Новая структура для оптоволоконного датчика температуры Фабри-Перо // Лайтвэйв технология. 2001. № 19. С. 682—686.
7. Ким С. Н., Ли Дж., Ли Д. и др. Исследование по разработке внешнего интерферометрического волоконно-оптического датчика Фабри-Перо // Лайтвэйв технология. 1995. № 17. С. 1869—1874.
8. Rao Y. J., Ran Z. L., Gong Y. Fiber Optic Sensors Fabry-Perot // CRC Press. 2017. P. 23—29.
9. Xiong X. C., Zhu Y., Fu Y. M. et al. Fiber Fabry-Perot sensor and its application for bridge deformation control // Scientific Bulletin. Beijing. 2015. P. 44—56.
10. Михайлов С. Ю. Датчики с волоконной брэгговской решеткой для жестких условий // Датчики-пресс. 2012. № 12. С. 1898—1918.
11. Ван Ю. Л., Ши Б., Чжан Т. Л. и др. Введение в инклинометр на основе FBG и его применение для мониторинга оползней // Фотон-пресс. 2015. № 5(5). С. 645—653.
12. Li T., Tan Y., Zhou Z. et al. Research of the FBG non-contact vibration sensor and its application // Photonic Sens. 2015. № 5(2). P. 128—136.
13. Qiao X., Wang Y., Yang H. et al. Ultrahigh-temperature Bragg grating made of chirped fiber by thermal activation // IEEE Photon Technol Lett. 2015. № 27(12). P. 1305—1308.
14. Чжан Х., Лю Х., Чжан Ф. и др. Надежный высокочувствительный геофон БВ для низкочастотного сейсмического захвата // Научный вестник. 2018. № 129. С. 62—67.

FIBER OPTIC SENSOR TECHNOLOGIES FOR HYPERSONIC WIND TUNNEL TESTING

V. V. Kabakov

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

The article examines fiber technology and provides empirical dependences of the benefits of using fiber optic sensors in aerospace technology.

Keywords: fiber optic sensor, hypersonic wind tunnel, rigid medium, space technologies, Bragg grating.

Bibliography — 14 references.

Received September 28, 2020

УДК 004.02

АНАЛИЗ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ

Ле Ань Ту

ФГАОУВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Россия

А. А. Жиленков, канд. техн. наук

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

Дано краткое изложение основного принципа анализа сигналов при диагностике неисправностей оборудования. Описаны исследования, а также показаны некоторые преимущества и ограничения, связанные с каждым типом частотно-временного метода анализа сигнала.

Ключевые слова: частотно-временной анализ, вейвлеты, машины, диагностика неисправностей.

Мониторинг состояния оборудования и диагностика неисправностей становятся все более значимыми в связи с постоянно растущими потребностями критически важных и передовых машин в энергетике, авиации, химической промышленности, обрабатывающей промышленности и т. д. Анализ вибрационных сигналов при мониторинге состояния и диагностике неисправностей практиковался десятилетиями. Вибрационный сигнал обычно анализируют с использованием STFT. Частотно-временной анализ сигналов был разработан для преодоления недостатка методов, основанных на быстром преобразовании Фурье (БПФ) [1]. STFT представляет собой самый ранний этап частотно-временного анализа сигнала. Это важный прорыв в частотно-временном анализе сигналов. STFT локализуется во времени и частоте одновременно и поэтому преодолевает недостатки методов, основанных на быстром преобразовании Фурье, при обработке нестационарных сигналов. Впоследствии было введено вейвлет-преобразование (WT) для улучшения возможности анализа сигналов STFT.

WT привлекает большое внимание исследователей всего мира. Опубликовано значительное количество посвященных ему работ. WT использовали для анализа неисправности коробки

передач [2], ультразвукового измерения толщины слоя жидкости [3], диагностики повреждения луча [4] и т. д.

Появился относительно новый метод самоадаптивного анализа сигналов — EMD для анализа нестационарного сигнала. Это предоставляет альтернативу для исследователей при нестационарной обработке сигналов.

Цель данной работы — краткий обзор предмета частотно-временного анализа сигналов для диагностики неисправностей оборудования.

Кратковременное преобразование Фурье (STFT)

Недостатки быстрого преобразования Фурье при обработке нестационарных сигналов преодолены введением кратковременного преобразования Фурье (STFT), которое локализовано как по времени, так и по частоте [1]. Математическая модель STFT имеет вид [5]

$$S_x^{(r)}(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{r(t - \tau)} e^{-j\omega t} dt. \quad (1)$$

STFT локализуется по времени и частоте одновременно с использованием фиксированного частотно-временного окна. Это означает, что нельзя получить хорошее временное разрешение, используя узкое окно для анализа высокочастотных компонентов, и хорошее частотное разрешение, используя широкое окно для анализа низкочастотных компонентов [1]. Следовательно, STFT — не идеальный метод анализа нестационарных сигналов, а, скорее, анализ, подходящий для квазистационарных сигналов [6].

Ту Ле Ань, аспирант.

E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

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

E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2020 г.

© Ту Ле Ань, Жиленков А. А., 2020

Вейвлет-преобразование (WT)

При WT используют метод расширения и трансляции для многомасштабного анализа сигнала, поэтому он способен эффективно извлекать частотно-временные характеристики сигнала [6]. Следовательно, вейвлет-преобразование больше подходит для нестационарного анализа сигналов. Анализ вейвлет-сигнала может отображаться в различных формах. Эта гибкость предоставляет исследователям возможность выбора наилучшего отображения результатов их анализа. Методы визуализации и анализа вейвлет-анализа: вейвлет-карты, дискретные многоэтапные вейвлет-коэффициенты разложения, извлечение вейвлет-функции, сжатие вейвлет-сигнала, вейвлет-шумоподавление и т. д. На рис. 1 приведен пример полярной визуализации вейвлет-анализа.

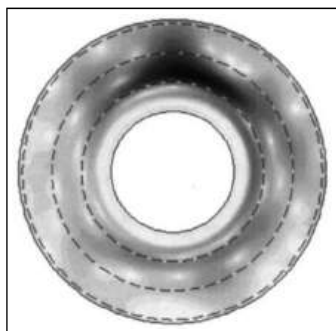


Рис. 1. Карты полярных вейвлетов [7]

Математическая модель WT дается формулой [5]

$$W_x^{(\psi)}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt. \quad (2)$$

Вейвлет-преобразование является хорошим средством изучения того, как частотный состав изменяется во времени, и впоследствии способно обнаружить и локализовать кратковременные явления [8]. Для достижения лучших результатов при вейвлет-анализе предложен ряд вейвлет-подходов, таких, как вейвлет-преобразование второго поколения [9], эрмитов вейвлет [10], вейвлет Морле [11] и т. д. Вейвлет-подход широко применяется. Для контроля состояния вращающихся механизмов, таких, как подшипник [11], коробка передач [8], ротор [12] и т. д. [11], предложен новый гибридный метод, основанный на оптимальном вейвлет-фильтре Морле и усилении автокорреляции. Это устраняет частоту, связанную с интерференционными колебаниями, путем фильтрации с помощью полосового фильтра, определяемого вейвлетом Морле. Подход Ван и соавторов [8] к диагностике неис-

правностей редуктора основан на комплексном непрерывном вейвлет-преобразовании Морле. Остаточный сигнал движения зубчатого колеса, проанализированный как исходные данные, и параметр роста неисправности, основанный на амплитуде вейвлет-преобразования, предложены для оценки неисправности зубчатого колеса [12]. Представлены новые индексы для диагностики оборванных стержней ротора в трехфазных асинхронных двигателях, основанные на вейвлет-коэффициентах тока статора в определенной полосе частот. Эти показатели, по-видимому, способны точно диагностировать возникновение и определять количество оборванных стержней при разных нагрузках.

Результаты вейвлет-анализа зависят от выбора базовой функции вейвлета. Это означает, что только характеристики сигнала, которые хорошо коррелируют с формой базовой функции вейвлета, имеют шанс получить высокие значения коэффициентов [1]. Следовательно, предварительное предположение о характеристиках сигнала может полностью игнорировать другие важные его характеристики.

Эмпирическая модовая декомпозиция (EMD)

EMD является одним из самых мощных разработанных методов частотно-временного анализа [1]. Это метод самоадаптивного анализа сигналов. Он может разложить сложный сигнал на набор функций внутреннего режима (IMF) на основе локальных характерных временных шкал сигнала [13]. IMF — это колебательные моды, встроенные в сигнал и работающие как базисные функции, определяемые самим сигналом [14]. Таким образом, это самоадаптивный метод обработки сигналов, который подходит для нелинейных и нестационарных сигналов процесса. На рис. 2 приведен пример анализа EMD.

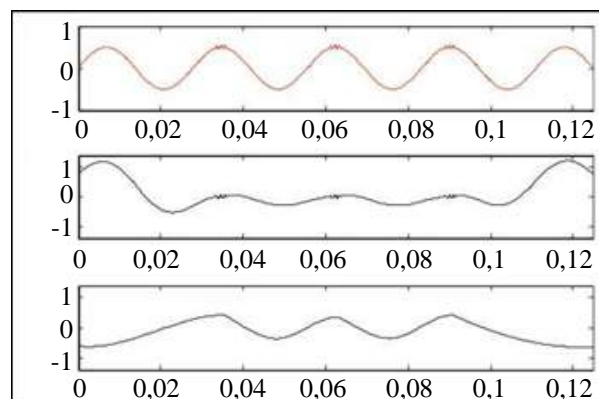


Рис. 2. Визуализация техники EMD [13]

IMF должен удовлетворять двум условиям. Во-первых, число локальных экстремумов и число пересечений нуля IMF должны быть равны или отличаться не более чем на единицу. Во-вторых, в любой момент времени t среднее значение верхней и нижней огибающих IMF должно быть равно нулю [14]. Не существует строгой математической модели EMD. Он строит базовую линию, соединяя все локальные максимумы и минимумы с кубическими сплайнами, а затем усредняет их, следуя алгоритму [15]. Исходный сигнал $x(t)$ в конце процесса разложения может быть выражен как сумма:

$$x(t) = \sum_{i=1}^K C_i(t) + r(t). \quad (3)$$

Метод EMD широко применяют при диагностике неисправностей компонентов во вращающихся механизмах из-за привлекательной характеристики надежности при наличии нелинейных и нестационарных данных [15]. Значительное количество исследований опубликовано в области диагностики неисправностей подшипников качения, зубчатых колес, ротора ([14] и др.). Идентифицированы события входа и выхода элемента качения, встречающегося с отрывом во внешнем кольце подшипника, с помощью EMD измерением временного интервала между ними, используемого для определения размера области разлома. Предложена новая модель для диагностики неисправностей редуктора, основанная на EMD и многоклассовой машине опорных векторов [14]. Разработана методология обнаружения трещин дыхания с использованием супергармонических компонент, полученных методом EMD, в сочетании со спектром WT на $1/3$ и $1/2$ от критической скорости [16, 17].

Хотя метод анализа сигналов EMD показывает выдающуюся производительность при обработке нелинейных и нестационарных сигналов, изменение базовой линии не всегда означает улучшение оригинального метода EMD [15], поскольку сам алгоритм имеет некоторые недостатки. Исследователи прилагают все усилия для достижения лучших результатов в диагностике неисправностей с помощью усовершенствованного метода EMD. Обобщенная EMD дала лучший среди всех EMD-подобных методов результат [15].

ННТ задумывали как метод численной постобработки для анализа нестационарных и нелинейных временных рядов с использованием EMD в качестве базисной функции [14]. Есть два шага для ННТ. Во-первых, EMD уменьшает анализируемый временной ряд до IMF. Во-вторых, верхнюю и нижнюю оболочки определяют методами интерполяции или экстраполяции. ННТ также имеет свои ограничения, поскольку может различать только заметные недостатки.

Выводы

Частотно-временной анализ сигналов перешел от неадаптивного к самоадаптивному. EMD является наиболее мощным самоадаптивным методом анализа сигналов, в то время как STFT и WT рассматривают как неадаптивные методы анализа сигналов. Хотя ННТ считают одним из лучших частотно-временных сигналов анализа, он не может преодолеть конечные эффекты, которые возникают, когда сигнал разлагается EMD. Следовательно, необходимо применять новый подход для преодоления этих ограничений, чтобы расширить его применение в диагностике неисправностей оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lei Y., Lin J., He Z., Zuo M. J.** A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. V. 35. № 1–2. P. 108–126.
2. **Chen J., Zi Y., He Z., Wang X.** Adaptive redundant multiwavelet denoising with improved neighboring coefficients for gearbox fault detection // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. V. 38. № 2. P. 549–568.
3. **Jiao J., Liu W., Zhang J., Zhang Q., He C., Wu B.** Time-frequency analysis for ultrasonic measurement of liquid-layer thickness // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. V. 35. № 1–2. P. 69–83.
4. **Nguyen S. D., Ngo K. N., Tran Q. T., Choi S.-B.** A new method for beam-damage-diagnosis using adaptive fuzzy neural structure and wavelet analysis // *Mechanical Systems and Signal Processing*. P. 1–14.
5. **Qin S. R., Zhong Y. M.** Research on the unified mathematical model for FT, STFT and WT and its applications // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004. V. 18. № 6. P. 1335–1347.
6. **Peng Z. K., Chu F. L.** Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography // *Mechanical Systems and Signal Processing*. V. 18. № 2. P. 199–221.
7. **Zhilentov A. A.** High productivity numerical computations for gas dynamics modelling based on DFT and approximation: 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus). Moscow, 2018. P. 400–403, doi: 10.1109/EConRus.2018.8317117.

8. **Wang X., Makis V., Yang M.** A wavelet approach to fault diagnosis of a gearbox under varying load conditions // J. Sound and Vibration. 2010. V. 329. № 9. P. 1570—1585.
9. **Li N., Zhou R., Hu Q., Liu X.** Mechanical fault diagnosis based on redundant second generation wavelet packet transform, neighborhood rough set and support vector machine // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. V. 28. P. 608—621.
10. **Li H., Zhang Y., Zheng H.** Application of Hermitian wavelet to crack fault detection in gearbox // Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. V. 25. № 4. P. 1353—1363.
11. **Zhilentov A. A., Epifantsev I. R.** Problems of a trajectory planning in autonomous navigation systems based on technical vision and AI: 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow, 2018. P. 1032—1035. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317265.
12. **Ebrahimi B. M., Faiz J., Lotfi-Fard S., Pillay P.** Novel indices for broken rotor bars fault diagnosis in induction motors using wavelet transform // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. V. 30. P. 131—145.
13. **Lei Y., He Z., Zi Y.** Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery // Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. V. 23. № 4. P. 1327—1338.
14. **Guo C., AL-Shudeifat M. A., Yan J., Bergman L. A., McFarland D. M., Butcher E. A.** Application of empirical mode decomposition to a Jeffcott rotor with a breathing crack // J. Sound and Vibration. 2013. V. 332. № 16. P. 3881—3892.
15. **Ivanov A. V., Zhilentov A. A.** The use of IMU MEMS-sensors for designing of motion capture system for control of robotic objects: 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow, 2018. P. 890—893. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317231.
16. **Доровской В. А., Черный С. Г.** Алгоритм идентификации моделей многокритериального оценивания диагностики судовой системы // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 4. С. 22—27.
17. **Жилентов А. А., Черный С. Г.** Сетевая система отказоустойчивого управления критически важными объектами морского транспорта // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 5. С. 35—38.

ANALYSIS OF TIME-FREQUENCY SIGNALS WHEN DIAGNOSTING EQUIPMENT FAULTS

Le An Tu

ITMO University, St. Petersburg, Russia

A. A. Zhilentov

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

This overview provides a summary of the main the principle of signal analysis, the most recent research, and some of the advantages and limitations associated with each type of time-frequency signal analysis method.

Keywords: time-frequency analysis, wavelets, cars, diagnostics of malfunctions.

Bibliography — 17 references.

Received September 15, 2020

УДК 338.24.01

ПРАКТИКА ПОДДЕРЖАНИЯ ДЕЙСТВИЯ ПАТЕНТОВ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ МОДЕЛИ, ПРАВООБЛАДАТЕЛЕМ КОТОРЫХ ЯВЛЯЕТСЯ РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

М. М. Вологина, канд. эконом. наук

АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение», г. Королёв, Московская обл., Россия

Проведен сравнительный анализ данных о действии патентов на изобретения и полезные модели, патентообладателем которых выступает Российская Федерация, а также данных о действии патентов на изобретения и полезные модели в целом по всем российским патентообладателям. Показана положительная тенденция деятельности государства как патентообладателя в процессе поддержания действия принадлежащих ему патентов на изобретения и полезные модели. Сделаны выводы о функционировании механизма поддержания патентов на изобретения и полезные модели, принадлежащих Российской Федерации, созданных в ходе выполнения работ по государственному оборонному заказу, в течение предусмотренного срока действия патентов на уровне, превышающем средний уровень по стране.

Ключевые слова: интеллектуальная собственность, патент на изобретение, полезная модель, патентная пошлина, срок действия патента, прекращение действия патента, восстановление действия патента, патентообладатель.

Порядок распределения прав на результаты интеллектуальной деятельности (РИД), получаемые при выполнении научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ (НИОКТР) в рамках государственного оборонного заказа в РФ, определен нормативными документами [1, 2]. Как правило, условиями государственных контрактов права на создаваемые РИД закрепляются за Российской Федерацией (РФ), от имени которой выступает конкретный государственный заказчик. Государственные заказчики определяют принадлежность исключительных прав на РИД и осуществляют в дальнейшем управление такими РИД, в том числе распоряжение путем заключения лицензионных договоров о предоставлении исключительной или неисключительной лицензии на право использования РИД, а также договоров об отчуждении исключительного права на РИД.

К числу охраняемых РИД (ст. 1225 ГК РФ) относятся изобретения, полезные модели, промышленные образцы, программы для ЭВМ, базы данных, секреты производства (ноу-хау).

Вологина Мария Михайловна, начальник отдела интеллектуальной собственности и научно-технической информации.

E-mail: oisnti@ktrv.ru

Статья поступила в редакцию 19 октября 2020 г.

© Вологина М. М., 2020

Практика показывает, что наибольшее количество РИД, создаваемых по гособоронзаказу, представляют собой технические решения. Программы для ЭВМ, базы данных и другие объекты авторского права, а также художественно-конструкторские решения, охраняемые как промышленные образцы, в данной работе не рассматриваются.

Технические решения в большинстве случаев получают охрану в качестве изобретений, полезных моделей, а также как секреты производства (ноу-хау). При этом исключительное право на изобретения и полезные модели имеет территориальный и временной характер. Это значит, что действие патента распространяется на определенную территорию в течение определенного срока. В РФ согласно ст. 1363 ГК РФ срок действия патента составляет 20 лет на изобретения и 10 лет на полезные модели.

Заключение договоров о распоряжении исключительными правами для правообладателя возможно только при условии действия патента на изобретение или полезную модель. Действие патента является основным критерием возможности распоряжения исключительными правами. Для поддержания действия патента необходимо ежегодно оплачивать пошлину.

Термин "предусмотренный срок действия патента" отличен от термина "действие патента". В первом случае термин характеризует законодательно установленный срок предоставления ис-

ключительного права (20 лет на изобретения, 10 лет на полезные модели), а во втором случае означает факт действия исключительного права в течение предусмотренного срока действия (т. е. исключительное право в силе, патент не утратил своего действия).

В России действие патента на изобретение или полезную модель может прекратиться досрочно при неуплате в установленный срок патентной пошлины за поддержание патента на изобретение или полезную модель (ст. 1399 ГК РФ).

Порядок и размеры уплаты патентных пошлин определены Положением о патентных и иных пошлинах [3]. Установленный срок для уплаты патентной пошлины означает, что за каждый последующий год действия патента пошлина должна быть уплачена в течение предыдущего года (см. п. 10 [3]). Законодатель предусматривает шестимесячный дополнительный срок для тех случаев, когда пропущен обычный срок уплаты пошлины, с возможно-

стью оплаты пошлины в увеличенном размере (см. п. 11 [3]).

Действие патента, прекращенное в связи с тем, что патентная пошлина за поддержание патента в силе не была уплачена в установленный срок, может быть восстановлено федеральным органом исполнительной власти по интеллектуальной собственности в течение трех лет со дня истечения срока уплаты патентной пошлины, но до истечения предусмотренного срока действия патента (п. 1 ст. 1400 ГК РФ).

По прошествии трех лет с момента истечения установленного срока для уплаты пошлины восстановить действие патента нельзя.

Размеры действующих в РФ ежегодных пошлин за поддержание в силе патентов на изобретения и полезные модели приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что за поддержание одного патента на изобретение в течение двадцати лет правообладатель заплатит 140200 руб., а за поддержание одного патента на полезную модель в течение десяти лет — 26400 руб.

Таблица 1

Годовые пошлины за поддержание в силе патентов на изобретения и полезные модели

Годы действия, считая с даты подачи заявки	Годовые пошлины за поддержание в силе патента на изобретение, руб.	Годовые пошлины за поддержание в силе патента на полезную модель, руб.
1-й	—	800
2-й	—	800
3-й	1700	1700
4-й	1700	1700
5-й	2500	2500
6-й	2500	2500
7-й	3300	3300
8-й	3300	3300
9-й	4900	4900
10-й	4900	4900
11-й	7300	—
12-й	7300	—
13-й	9800	—
14-й	9800	—
15-й	12200	—
16-й	12200	—
17-й	12200	—
18-й	12200	—
19-й	16200	—
20-й	16200	—
Итого	140200	26400

В среднем ежегодные затраты на пошлины за поддержание действия одного патента на изобретение после его получения составляют 7788,90 руб. при условии поддержания патента в течение всего предусмотренного срока действия, по полезной модели — 2640 руб.

В случае, если поддержание патентов осуществляется на всем предусмотренном сроке действия (20 лет для изобретений и 10 лет для полезных моделей), получение патентов происходит равномерно, т. е. количество получаемых ежегодно патентов равно количеству патентов, у которых заканчивается предусмотренный законом срок действия, и на поддержание, например, 100 патентов на изобретения необходимые ежегодные затраты патентообладателя составляют 778889 руб., а на поддержание 100 патентов на полезные модели патентообладателю необходимо ежегодно в среднем 264000 руб.

Закрепляя за собой исключительные права на изобретения и полезные модели, государственные заказчики, выступающие от имени РФ, определяют будущую судьбу таких изобретений и полезных моделей, обеспечивая в первую очередь действие патентов путем оплаты пошлин. У государственных заказчиков есть выбор: произвести оплату самим при единоличном правообладании или возложить эту ответственность на иное лицо, например на сообладателя при совместном правообладании или на приобретателя права использования при заключении лицензионного договора. Возможна проработка различных вариантов. Главное, успеть определить механизм уплаты пошлин до того, как патент утратит действие без возможности его восстановления.

Проанализируем, как обеспечивается поддержание действия патентов на изобретения и полезные модели, правообладателем которых является РФ.

Для этого обратимся к информации Федерального органа исполнительной власти по интеллектуальной собственности (Роспатент), который публикует в официальном бюллетене сведения о действии патентов, о прекращении и о восстановлении действия патента на изобретения и полезные модели. В систематизированном виде такая информация доступна на сайте ФГБУ ФИПС Роспатента (<https://www1.fips.ru/iiss/search>).

При этом в поисковой системе ФГБУ "Федеральный институт промышленной собственности" (<https://www1.fips.ru/iiss/search>) существует возможность поиска по четырем различным статусам действия: действует; может прекратить

действие; прекратил действие, но может быть восстановлен; не действует.

Статус "действует" в поисковой системе присваивается патентам при уплате ежегодной пошлины за поддержание в силе действия патента вовремя, т. е. за каждый последующий год действия патента в течение предыдущего года (см. п. 10 [3]).

Статус "может прекратить действие" присваивается в том случае, когда уплаты пошлины вовремя не произошло, но согласно п. 11 [3] предоставлен дополнительный срок 6 месяцев, в течение которого пошлину можно оплатить в размере, увеличенном на 50 %.

Статус "прекратил действие, но может быть восстановлен" присваивается в том случае, когда пропущены предусмотренные по пп. 10, 11 [3] сроки для уплаты ежегодной пошлины за поддержание в силе действия патента, включая дополнительный шестимесячный срок, однако еще длится трехлетний льготный период после прекращения уплаты пошлин, в пределах которого возможно восстановление действия патента согласно п. 1 ст. 1400 ГК РФ.

Статус "не действует" присваивается в том случае, когда восстановление действия патента уже невозможно.

Сведения о выдаче патентов на имя Российской Федерации стали появляться с 2004 г., в котором были опубликованы данные о единичных случаях получения таких патентов. В связи с этим статистическая подборка по публикациям закрепленных за РФ изобретений была проведена с 2005 по 2019 г. и с 2010 по 2019 г. для полезных моделей. При этом деления изобретений и полезных моделей по такому признаку, как единоличное или совместное правообладание РФ, не осуществлялось. Исследовался весь массив изобретений и полезных моделей, правообладателем которых является РФ.

В табл. 2, 3 представлены данные о действии патентов на изобретения и полезные модели, выданных на имя РФ, в различных статусах действия на момент 01.10.2020 в зависимости от года публикации сведений о получении патентов (в табл. 2 — по изобретениям, в табл. 3 — по полезным моделям).

Для сравнения в табл. 4, 5 приведены данные о действии в РФ патентов на изобретения и полезные модели в целом по всем правообладателям в различных статусах действия на 01.10.2020 в зависимости от года публикации сведений о получении патентов (в табл. 4 — по изобретениям, в табл. 5 — по полезным моделям).

Таблица 2

Процентное соотношение действующих на 01.10.2020 в различных статусах патентов на изобретения, принадлежащих РФ, сведения о получении которых опубликованы в период с 2005 по 2019 гг.

Год публикации патента	Общее количество опубликованных изобретений на имя РФ (100 %)	Процент патентов со статусом "действует"	Процент патентов со статусом "может прекратить действие"	Процент патентов со статусом "прекратил действие, но может быть восстановлен"	Процент патентов со статусом "не действует"
2005	66	47,0	6,0	1,5	45,5
2006	102	54,9	2,0	1,0	42,1
2007	88	61,4	0,0	0	38,6
2008	116	66,4	3,4	1,7	28,5
2009	169	70,4	4,7	4,7	20,1
2010	287	61,3	2,5	10,8	25,4
2011	406	63,5	3,5	9,8	23,2
2012	547	66,4	3,8	11,3	18,3
2013	428	66,1	3,0	17,1	13,8
2014	429	68,5	2,6	12,1	16,8
2015	561	65,1	3,2	4,3	27,4
2016	436	78,0	3,9	6,0	12,1
2017	414	77,1	2,2	14,5	6,3
2018	480	80,0	3,5	16,0	0,4
2019	494	90,7	5,9	3,4	0,0

Таблица 3

Процентное соотношение действующих на 01.10.2020 в различных статусах патентов на полезные модели, принадлежащих РФ, сведения о получении которых были опубликованы в период с 2010 по 2019 гг.

Год публикации патента	Общее количество опубликованных полезных моделей на имя РФ (100 %)	Процент со статусом "действует"	Процент патентов со статусом "может прекратить действие"	Процент патентов со статусом "прекратил действие, но может быть восстановлен"	Процент патентов со статусом "не действует"
2010	126	0	0	0,0	100,0
2011	173	27,2	22,5	2,9	47,4
2012	179	63,7	8,9	6,1	21,2
2013	275	61,8	14,5	5,5	18,2
2014	215	58,1	3,3	10,2	28,4
2015	172	58,1	5,2	8,1	28,5
2016	136	42,6	5,9	8,1	43,4
2017	127	50,4	2,4	27,6	19,7
2018	125	72,8	3,2	24,0	0,0
2019	83	72,3	16,9	10,8	0,0

Таблица 4

Процентное соотношение действующих на 01.10.2020 в различных статусах всех российских патентов на изобретения, сведения о получении которых опубликованы в период с 2005 по 2019 гг.

Год публикации патента	Общее количество опубликованных изобретений всех патентообладателей (100 %)	Процент патентов со статусом "действует"	Процент патентов со статусом "может прекратить действие"	Процент патентов со статусом "прекратил действие, но может быть восстановлен"	Процент патентов со статусом "не действует"
2005	26274	16,5	1,1	3,7	78,7
2006	25830	21,4	1,1	4,5	73,0
2007	23479	26,0	1,3	5,3	67,4
2008	29125	27,4	1,7	5,9	65,0
2009	34979	33,7	1,7	6,8	57,8
2010	30480	36,5	1,7	8,3	52,5
2011	30125	46,7	2,1	8,9	46,7
2012	33129	42,5	2,2	10,0	45,3
2013	31912	46,3	2,6	11,2	39,9
2014	34186	52,6	3,2	12,3	31,9
2015	34817	51,4	3,5	14,8	30,3
2016	34043	64,0	4,2	16,0	15,8
2017	34292	63,2	5,4	28,2	3,2
2018	36010	73,4	8,0	18,5	0,1
2019	33926	88,9	8,6	2,5	0,0

Таблица 5

Процентное соотношение действующих на 01.10.2020 в различных статусах всех российских патентов на полезные модели, сведения о получении которых опубликованы в период с 2010 по 2019 гг.

Год публикации патента	Общее количество опубликованных полезных моделей всех патентообладателей (100 %)	Процент патентов со статусом "действует"	Процент патентов со статусом "может прекратить действие"	Процент патентов со статусом "прекратил действие, но может быть восстановлен"	Процент патентов со статусом "не действует"
2010	10558	0,0	0,0	0,0	100,0
2011	11079	12,7	5,5	8,2	73,6
2012	11690	25,3	3,2	10,8	60,7
2013	12642	30,0	3,4	12,7	53,9
2014	13142	33,7	3,3	14,1	48,9
2015	9018	38,6	4,1	15,0	42,3
2016	8892	43,9	4,7	17,9	33,5
2017	8779	50,1	4,6	29,8	15,4
2018	9885	57,7	7,0	34,3	1,0
2019	8826	69,1	16,4	13,9	0,6

Данные табл. 2—5 сведены в графики динамики поддержания действия патентов, представленные на рис. 1, 2. Рис. 1 отражает сравнительную динамику поддержания патентов на изобретения, а рис. 2 — на полезные модели.

Анализируя данные, представленные в табл. 2—5 и на рис. 1, 2, можно убедиться в том, что

по сравнению с тем, как меняются статусы действия у всех российских патентов в целом по стране, утрата действия в связи с неуплатой пошлин за поддержание патентов, принадлежащих РФ, происходит медленнее.

47,0 % патентов на изобретения, принадлежащих РФ, сведения о получении которых

опубликованы в 2005 г., продолжают действовать в статусе "действует". По ним ежегодно уплачиваются пошлины за поддержание ввремя.

В целом по России имеется 16,5 % действующих в статусе "действует" патентов на изобретения, сведения о получении которых опубликованы в 2005 г. Это почти в 3 раза меньше, чем количество патентов, правообладателем которых

является РФ, от чьего имени выступают государственные заказчики.

По полезным моделям ситуация сходная. Процент действующих патентов на последнем году предусмотренного срока действия, принадлежащих Российской Федерации, превышает среднее значение по стране более чем в 2 раза.

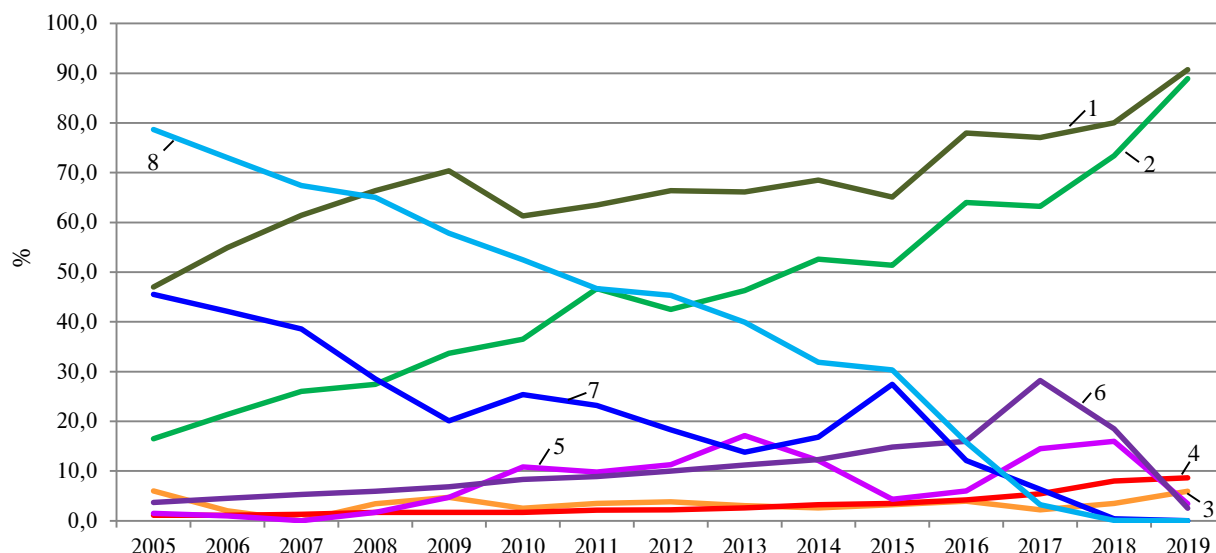


Рис. 1. Сравнительная динамика изменения статусов действия патентов на изобретения на 01.10.2020 в зависимости от даты публикации сведений о получении патента:

1 — на имя РФ со статусом "действует"; 2 — всех патентообладателей со статусом "действует"; 3 — на имя РФ со статусом "может прекратить действие"; 4 — всех патентообладателей со статусом "может прекратить действие"; 5 — на имя РФ со статусом "прекратил действие, но может быть восстановлен"; 6 — всех патентообладателей со статусом "прекратил действие, но может быть восстановлен"; 7 — на имя РФ со статусом "не действует"; 8 — всех патентообладателей со статусом "не действует"

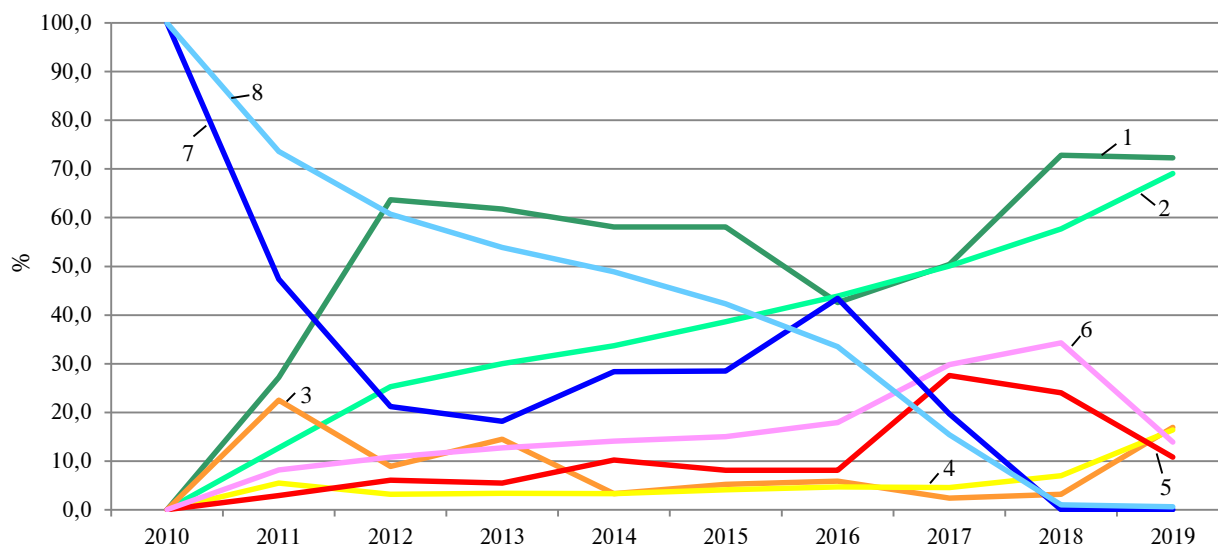


Рис. 2. Сравнительная динамика изменения статуса действия патентов на полезные модели на 01.10.2020 в зависимости от даты опубликования сведений о получении патента:

1 — на имя РФ со статусом "действует"; 2 — всех патентообладателей со статусом "действует"; 3 — на имя РФ со статусом "может прекратить действие"; 4 — всех патентообладателей со статусом "может прекратить действие"; 5 — на имя РФ со статусом "прекратил действие, но может быть восстановлен"; 6 — всех патентообладателей со статусом "прекратил действие, но может быть восстановлен"; 7 — на имя РФ со статусом "не действует"; 8 — всех патентообладателей со статусом "не действует"

Подача заявки на изобретение или полезную модель, как правило, происходит примерно на год раньше даты опубликования сведений о получении патента.

Для опубликованных в 2005 г. патентов на изобретения начало срока действия исчисляется с 2004 г., и в 2020 г. они находятся на семнадцатом году своего предусмотренного двадцатилетнего срока действия. Для многих патентообладателей может иметь значение и величина пошлины. Как уже упоминалось, размер пошлины за поддержание изобретения за семнадцатый год составляет 12200 руб. (см. табл. 1). Стоимость поддержания действия патентов на полезную модель меньше, чем на изобретение, однако процент сохраняющих свое действие патентов на полезные модели до окончания предусмотренного срока

действия в целом невелик (12,7 %). У РФ он составляет 27,2 %.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что механизм поддержания действия исключительных прав на изобретения и полезные модели в государстве работает, хотя и не на 100 %.

В заключение следует сделать вывод о том, что независимо от причин, влияющих на сохранение действия патентов для каждого патентообладателя, Российская Федерация обеспечивает поддержание принадлежащих ей патентов на изобретения и полезные модели на протяжении всего предусмотренного для них срока действия выше среднего уровня по стране. Это говорит о существовании определенного потенциала для коммерциализации государственной интеллектуальной собственности в стране.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила осуществления государственными заказчиками управления правами Российской Федерации на результаты интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения (утв. Постановлением Правительства РФ от 22.03.2012 № 233 с изменениями и дополнениями от 30.05.2013, 2.06.2016, 25.08.2017, 1.03.2018, 28.09.2018, 30.03.2019).

2. Постановление Правительства РФ от 22.04.2009 № 342 "О некоторых вопросах регулирования закрепления прав на результаты научно-технической деятельности" (с изменениями и дополнениями от 8.12.2011, 18.03.2020).

3. Положение о патентных и иных пошлинах за совершение юридически значимых действий, связанных с патентом на изобретение, полезную модель, промышленный образец, с государственной регистрацией товарного знака и знака обслуживания, с государственной регистрацией и предоставлением исключительного права на наименование места происхождения товара, а также с государственной регистрацией отчуждения исключительного права на результат интеллектуальной деятельности или средство индивидуализации, залога исключительного права, предоставления права использования такого результата или такого средства по договору, перехода исключительного права на такой результат или такое средство без договора. (Утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 10.12.2008 № 941 с изменениями от 15.09.2011, 14.11.2013, 22.03.2016, 23.09.2017, 4.06.2020).

THE PRACTICE OF MAINTAINING THE VALIDITY OF PATENTS FOR INVENTIONS AND UTILITY MODELS BELONGING TO THE RUSSIAN FEDERATION

M. M. Vologina

Tactical Missiles Corporation JSC, Korolev, Moscow region, Russia

The article provides a comparative analysis of data on the validity of patents for inventions and utility models, the patentee of which is the Russian Federation, as well as data on the validity of patents for inventions and utility models in General for all Russian patentees. The positive trend of the state's activity as a patentee in the process of maintaining the validity of its patents for inventions and utility models is shown. Conclusions are drawn about the functioning of the mechanism for maintaining patents for inventions and utility models belonging to the Russian Federation, created in the course of work on the state defense order, during the stipulated period of validity of patents at a level exceeding the national average.

Keywords: intellectual property, patent for an invention, utility model, patent fee, patent term, patent termination, patent restoration, patent owner.

Bibliography — 3 references.

Received October 19, 2020

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России: Межотр. науч.-техн. журнал / Федеральное государственное унитарное предприятие «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2020. Вып. 4. С. 1—64.

Редактор *О. А. Константинова*

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

Подписано в печать 05.11.2020. Формат 60x84 1/8.

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

Тираж 250 экз. Заказ 1960.

Свободная цена.

Адрес редакции: 125424, Москва,

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

Отпечатано в ООО «РАПИТОГРАФ».

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

Индекс 79379.

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 выбираются из числа ученых и специалистов, компетентных в вопросах, рассматриваемых в статье, и имеющих собственные публикации в данном направлении. Решение о порядке публикации статьи принимается редколлегией 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 вместо 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 на CD/DVD-диске с текстом в формате Word.

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;
- с отступлением в 2 строки представляется аннотация статьи;
- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);
- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литературных 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 таблицы:

- 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).

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2021 г.
на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»**

Наименование издания	Периодичность в год	Цена 1 экз., руб.	Кол-во выпусков в год	Общая сумма, руб.
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России	4	1550,00		
Конструкции из композиционных материалов	4	1700,00		
Экология промышленного производства	4	1500,00		
Информационные технологии в проектировании и производстве	4	1750,00		
Вопросы защиты информации	4	1750,00		
<i>В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.</i>				

Поставка журналов подписчикам через издательство осуществляется почтовыми бандеролями с приложением всех необходимых бухгалтерских документов.

Наши реквизиты:

Полное наименование организации: _____

Сокращенное наименование организации: _____

ИНН/КПП _____

ОКПО _____

Расчётный счёт № _____ в _____

к/с _____ БИК _____

Юридический адрес: _____

Почтовый адрес: _____

Контактное лицо _____ тел. _____

E-mail: _____

(Для оформления счёта и бухгалтерских документов просьба заполнить все строчки).

Справочно:

Заполненный бланк-заказ просьба отправить по факсу: 8(495) 491-44-80 или

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

Более подробную информацию об изданиях и подписке можно получить по телефону:

8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-20.

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское шоссе, д.77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».