

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 51-74 EDN POURBW

**Методика автоматизированной обработки результатов  
виртуальных испытаний изделий  
радиоэлектронной аппаратуры**

**С. А. Яхутин**, аспирант, *yakhutin.sa@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**В. Д. Сегов**, аспирант, *segov.vd@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. А. Никитин**, инженер, *nikitin.aa@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. Ю. Потюпки**н, д. т. н., проф., *potyurkin\_in@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Исследуется задача проведения виртуальных испытаний изделий радиоэлектронной аппаратуры. Рассматриваемая задача относится к классу задач контроля состояния, предполагающих задание классов состояний, их признаков и состава измеряемых параметров, обеспечивающих наблюдаемость заданных классов, т. е. единственность решения с заданной достоверностью. Анализируются проблемные вопросы проведения виртуальных испытаний, формулируется постановка задачи на разработку методики автоматизированной обработки результатов виртуальных испытаний, позволяющей выносить обоснованные заключения о годности изделий с указанием меры достоверности. Дано формальное решение задачи на основе теории нечетких множеств и предложен алгоритм методики обработки результатов виртуальных механических испытаний. Приведен пример реализации методики для определения прочности конструкции. Определен критерий адекватности модели, позволяющий снижать погрешность испытаний и создавать рациональную топологию размещения виртуальных датчиков. Полученные результаты исследования позволяют существенно ускорить процесс разработки и испытаний радиоэлектронной аппаратуры, а также повысить их качество и надежность.

**Ключевые слова:** виртуальные испытания, методика, цифровой двойник, мера достоверности, функция принадлежности

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

## Methodology for Automated Processing of Virtual Test Results of Electronic Equipment Products

**S. A. Yakhutin**, *postgraduate student, yakhutin.sa@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**V. D. Segov**, *postgraduate student, segov.vd@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. A. Nikitin**, *engineer, nikitin.aa@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. Yu. Potyupkin**, *Dr. Sci (Engineering), Prof., potyupkin\_in@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The problem to conduct virtual tests of products of electronic equipment is studied. The problem under consideration belongs to the class of state control problems involving the specification of classes of states, their attributes, and the composition of measured parameters that ensure observability of the specified classes, i.e., the uniqueness of the solution with a given reliability. The problematic issues of conducting virtual tests are analyzed. The problem statement is formulated for the development of a methodology for automated processing of virtual testing results, which makes it possible to make reasonable conclusions about the suitability of products with an indication of the reliability measure. A formal solution of the problem based on the theory of fuzzy sets is given, and an algorithm for the method of processing the results of virtual mechanical tests is proposed. An example of the implementation of the methodology for determining the strength of the structure is given. The criterion of model adequacy is determined, which allows reducing the testing error and creating a rational topology of virtual sensors placement. The obtained research results permits one to significantly accelerate the process of development and testing of electronic equipment, as well as to improve their quality and reliability.

**Keywords:** virtual tests, methodology, digital twin, reliability measure, membership function

## Введение

Важной составной частью жизненного цикла изделий радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является этап испытаний, реализуемый на практике, в том числе и в ходе наземной экспериментальной обработки (НЭО).

Под испытаниями будем понимать экспериментальное определение количественных и/или качественных характеристик свойств объекта испытаний при его функционировании или моделировании. При этом определение включает оценивание и (или) контроль. «Процесс испытаний является многоэтапным и зачастую итерационным. Анализ результатов очередного этапа испытаний может потребовать проведения коррекции конструкторской документации и повторения испытаний. Основное назначение этапов испытаний заключается в выявлении слабых мест в принятых при проектировании РЭА решениях, их устранение по результатам испытаний и финальное подтверждение соответствия аппаратуры требованиям технического задания. Конечной целью любых испытаний является обеспечение требуемых показателей надежности изделия в условиях внешних воздействующих факторов (ВВФ) на основе комплексной модели надежности промышленного изделия» [1].

Традиционно испытаниям подвергались опытные образцы РЭА или их комплектующие, т. е. проводились так называемые натурные испытания с предварительным проведением расчетов на стойкость к воздействующим факторам. Однако, в связи с развитием информационных технологий, в настоящее время получают широкое распространение виртуальные испытания (ВИ) как испытания, проводимые с помощью программно-аппаратных средств на основе компьютерного моделирования и априорных оценок воздействующих факторов на промышленное изделие. Они призваны прежде всего уменьшить общее количество натурных испытаний на производстве, снизив, таким образом, затраты финансовых и временных ресурсов на отработку как типовых, так и принципиально новых изделий.

Помимо известных преимуществ по сокращению сроков и затрат на проведение НЭО, ВИ позволяют обеспечить проведение испытаний в критических режимах, воспроизвести комплексные воздействия дестабилизирующих факторов, невозпро-

изводимые в наземных условиях и обеспечить максимальную информативность о характеристиках изделий путем целенаправленной установки виртуальных датчиков в требуемых точках конструкции изделия.

Необходимым условием проведения ВИ является наличие адекватного цифрового двойника изделия (ЦДИ) как виртуального прототипа реального физического объекта с отображением его свойств и характеристик, включающего двусторонние информационные связи с изделием и/или его составными частями [2–5].

Основными задачами в ходе ВИ являются:

- создание адекватного виртуального двойника изделия, предъявляемого к испытаниям;
- прогнозирование реакции на внешние механические воздействия, внешние и внутренние тепловые нагрузки;
- выявление потенциально слабых мест исходя из условий прочности, усталостной долговечности материалов, допустимых расчетных температур и иных характеристик.

«Достоверность результатов, получаемых при помощи виртуальных испытаний, зависит от точности данных, используемых для создания цифрового двойника, в том числе применяемых методик; наличия результатов натурных испытаний аналогичных конструкций для возможности проведения верификации и сравнения результатов; качества расчетной сетки; степени математических упрощений; квалификации специалистов, проводящих испытания.

Виртуальные испытания подразделяются на тепловые и механические. Виртуальные механические испытания (ВМИ) позволяют определить физическую целостность конструкции, напряжения, возникающие во время воздействия механических нагрузок, а также значения перемещений и ускорений частей конструкции» [6]. Тепловые ВИ позволяют оценить температурное состояние изделия и его элементов в заданных условиях. Общая схема проведения ВМИ приведена на рис. 1.

ВМИ являются наиболее сложным видом ВИ и позволяют проводить следующие виды расчетов:

- модальный анализ для вычисления собственных частот и их форм в заданном диапазоне и определения массовых коэффициентов для проведения дальнейших анализов;

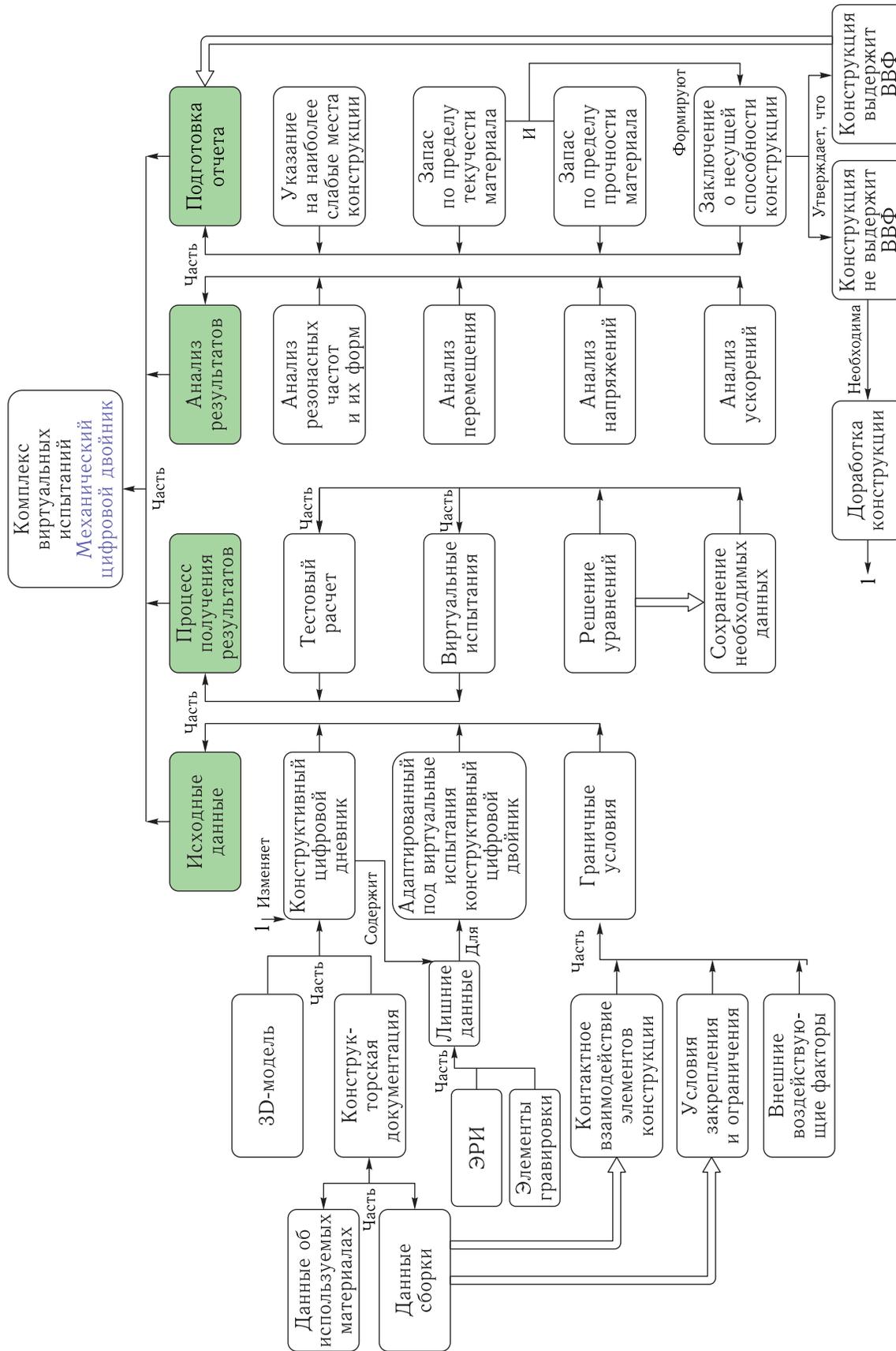


Рис. 1. Общая схема проведения ВМИ

- анализ воздействия случайной широкополосной вибрации (СШВ) для определения напряженно-деформированного состояния (НДС), возникающего в конструкции при механическом воздействии;

- анализ воздействий квазистатической нагрузки для определения НДС от действия линейных ускорений, распределенных или сосредоточенных сил, вынужденных перемещений;

- анализ воздействия гармонической нагрузки для определения НДС, обычно на нижней резонансной частоте (НРЧ), определенной для каждой оси после модального анализа;

- ударное воздействие для определения множества ускорений в точках объекта испытаний;

- оценку усталостных характеристик для вибрационных воздействий для расчета допустимого числа циклов нагружения при заданной нагрузке.

Полученные данные позволяют определить целостность корпуса прибора (изделия). Не менее важной задачей является определение работоспособности электрорадиоизделий (ЭРИ), применяемых в приборе, после механического воздействия; для этой оценки применяется метод прямого сравнения расчетной нагрузки, полученной в результате ВМИ с максимально допустимой указанной в технических условиях на конкретное ЭРИ. Таким образом, показателем оценки работоспособности ЭРИ и прибора в целом служит значение действующих на ЭРИ нагрузок. Данный подход недостаточно информативен и в ряде случаев имеет расхождение с результатами натуральных испытаний конкретных образцов приборов. На сегодняшний день необходимо разработать и применять новые методы оценки работоспособности ЭКБ и прибора в целом, учитывающие современные технологии прогнозирования состояния изделий и процессов [6].

В общем случае будем считать, что работоспособность изделия в основном определяется целостностью корпуса прибора и работоспособностью ЭРИ, установленных в посадочных местах прибора. При этом открытым остается вопрос о влиянии термоциклического и радиационного воздействия на РЭА. Отметим сразу, что полученные в настоящей работе результаты могут быть адаптированы и для анализа воздействий указанных факторов.

В связи с этим общее правило принятия решения о работоспособности изделия будет выглядеть следующим образом:

*если по результатам ВМИ изделие работоспособно и ЭРИ работоспособны, то изделие в целом работоспособно.*

Следует отметить, что технология ВМИ в настоящее время достаточно хорошо апробирована на практике и реализуется в составе программных модулей инженерного анализа, например модулей в ANSYS WORKBENCH [7]. Исключение составляет этап обработки результатов и выводов, заключающихся в вынесении заключения, например «Объект по результатам ВИ годен» или «Не годен» с указанием причин возникших дефектов, остающийся прерогативой специалиста, проводящего испытания. При этом вопросы, связанные с оценкой достоверности такого заключения, в реальной практике не затрагиваются. Отдельно отметим вопрос автоматизации данного этапа, напрямую связанный с обеспечением требуемой производительности труда специалистов. В силу этого задача разработки методики автоматизированной обработки результатов ВИ, позволяющей выносить обоснованные заключения о годности изделий с указанием меры достоверности заключения, представляется актуальной.

## Постановка задачи

Рассматриваемая задача относится к классу задач контроля состояния, предполагающих задание классов состояний, их признаков и состава измеряемых параметров, обеспечивающих наблюдаемость заданных классов, т.е. единственность решения с заданной достоверностью. Учитывая специфику предметной области в постановке задачи должны быть указаны объект испытаний, его топология (структура) с указанием состава конструктивных элементов, подвергаемых испытаниям, тип конструкции, особенности конструктивных материалов, множество ЭРИ, установленных на изделии в соответствии с заданной топологией; множество выводов по результатам испытаний, виды испытаний, структура процесса испытаний, наличие цифрового двойника объекта испытаний, множества контролируемых признаков годности и измеряемых

параметров, установлена связь между ними; влияющие факторы и ограничения; показатель и критерий принятия решений.

Тогда формальная постановка задачи на разработку методики автоматизированной обработки результатов ВИ будет выглядеть следующим образом.

**Дано:**

- объект испытаний  $S = \{K, T, M, R\}$ , где  $K$  — тип конструкции,  $T$  — топология объекта,  $M$  — материал конструкции;  $R$  — множество ЭРИ, установленных на изделии в соответствии с заданной топологией;

- множество видов испытаний  $V = \{\text{механические, радиационные, термические}\}$ ;

- структура процесса испытаний  $Q = \{q_{\text{ид}}, q_{\text{тст}}, q_{\text{реал}}, q_{\text{обр}}, q_{\text{закл}}\}$ , где  $q_{\text{ид}}$  — оператор ввода исходных данных;  $q_{\text{тст}}$  — выбора тестовых воздействий и их параметров,  $q_{\text{реал}}$  — реализации тестовых воздействий,  $q_{\text{обр}}$  — фиксации и обработки результатов испытаний,  $q_{\text{закл}}$  — анализа результатов с выдачей заключения;

- множество выводов (решений) по результатам испытаний  $F = \{f_0, f_k\}$ , где  $f_0$  — «объект по результатам испытаний годен»,  $f_k$  — «объект по результатам испытаний негоден по  $k$ -й причине»;

- цифровой двойник объекта испытаний  $\Sigma = \{\pi_l\}$ , где  $\pi_l$  — параметры ЦДИ;

- множество тестовых воздействий  $\Omega = \{\omega\}$ ;

- множество измеряемых параметров для заданных видов испытаний  $H = \{h_v\}$ ;

- множество контролируемых признаков годности  $G = \{g\}$ , определяемых по результатам обработки измеряемых параметров;

- описание множества выводов в признаковом пространстве в виде отображений  $H \rightarrow G \rightarrow F$ ;

- множество влияющих факторов  $W$ ;

- показатель качества решения как мера достоверности принятия решения о результатах испытаний  $D = D(S, \Sigma, H/\Omega, W)$ ;

- критерий принятия решения о заключении по результатам испытаний

$$D \geq D_{\text{тр.}}$$

**Требуется** по результатам испытаний ЦДИ вынести заключение о его годности —  $f_0$  или негодности с указанием причин негодности —  $f_k$ .

Решение будем искать в виде  $f^* = \arg \max_F [D^0, D^k(H/W)]$ , где  $D^0, D^k$  — достоверности заключений.

Решение задачи предполагает обоснование и выбор показателя достоверности, базового метода решения задачи, разработку методики принятия решения о годности объекта по результатам ВИ, верификацию методики — оценку корректности результатов, исследование влияющих факторов.

## Решение задачи

Общая методологическая схема решения поставленной задачи включает в себя следующие этапы:

1. Анализ корпуса прибора в соответствии с видами испытаний.

2. Анализ состояния ЭРИ в соответствии с видами испытаний.

3. Адаптация структуры процесса ВИ с учетом степени адекватности ЦДИ.

4. Учет влияния топологии, т.е. места размещения виртуальных датчиков на ЭРИ с учетом анализа результатов конструкции

5. Принятие решения по результатам испытаний с учетом заключений по анализу корпуса прибора и анализу ЭРИ.

В качестве исходных данных для разработки методики примем, что разработчиком изделия в составе эксплуатационно-технической документации, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.37-2021, разработан ЦДИ, который описывает аспекты и детали, определяющие механическое поведение конструкции при воздействии на нее нагрузок, а также и адекватная система формирования визуальных образов. Данная система будет включать в себя виртуальные приборы, базовые конструктивные узлы объекта испытаний с возможностью их погружения во внешнюю среду и отображения особенностей функционирования. Известны и программные комплексы проведения ВИ, позволяющие осуществить все множество требуемых видов испытаний  $V$  путем реализации процесса испытаний  $Q$  на цифровом двойнике  $\Sigma$  с получением измерительной информации  $H$  и возможностью оценки признаков годности  $G$  и вынесения заключений о годности изделия  $F$ .

Алгоритм принятия решений будет базироваться на существующем алгоритме ВИ, который предполагает реализацию следующих этапов:

- загрузку ЦДИ в программную среду для проведения испытаний;
- разбиение ЦДИ на отдельные элементы (задание сетки) в виде конечно-элементной модели (КЭМ), характеризующие точность испытаний;
- выбор направлений подачи тестовых воздействий;
- подачу тестовых воздействий заданной номенклатуры;
- измерение выходных параметров;
- квантование результатов по уровням;

- визуальное отображение результатов квантования в цветовой гамме;
- принятие решения специалистом о годности или негодности изделия по результатам ВИ на основе анализа распределений цветовых оттенков по конструкции испытываемого образца;
- указание конструктивных элементов, критичных к подаваемым нагрузкам, в случае вывода о негодности объекта, с рекомендациями по их совершенствованию.

Пример изделия, его ЦДИ в виде КЭМ, представлен на рис. 2.

Результаты модального анализа ЦДИ и шкалы относительных перемещений для низшей собственной резонансной частоты приведены на рис. 3.

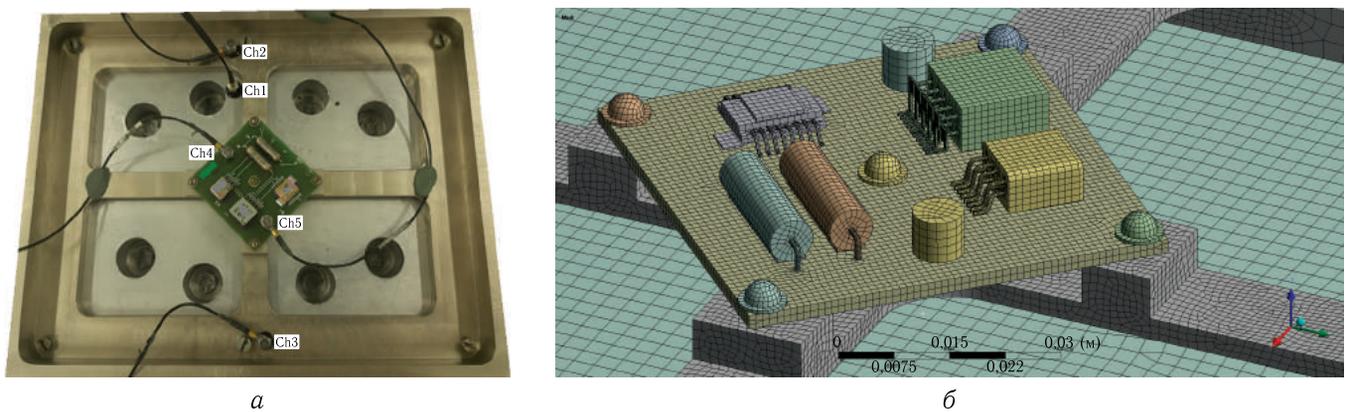


Рис. 2. Испытуемая плата с приспособлением для испытаний

**C: Modal**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 578,46 Hz  
 Unit: m

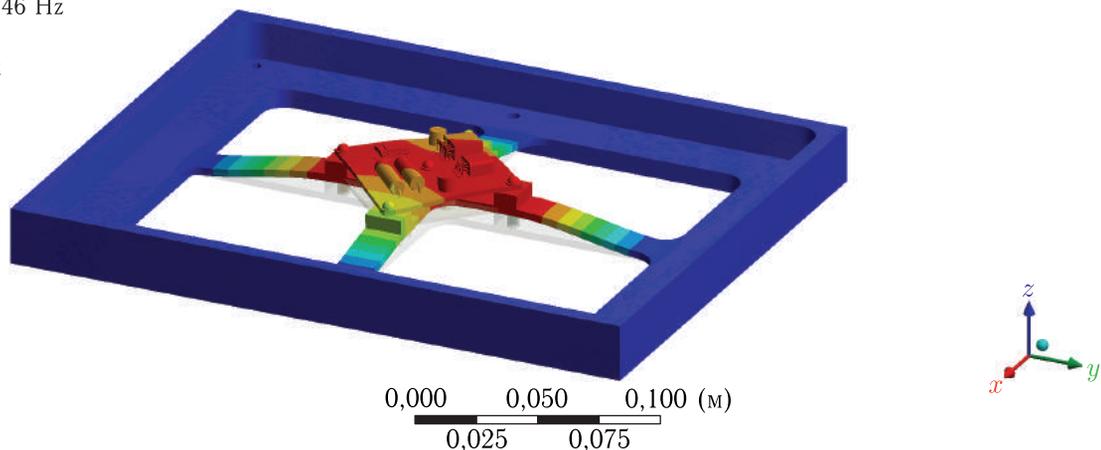
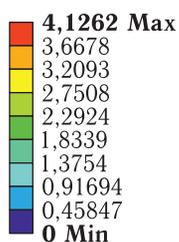


Рис. 3. Собственная форма колебания для низшей собственной резонансной частоты

Фактически специалист должен вывести количественные значения интересующих параметров, сравнить их с заданными допусками, а затем по результатам визуального анализа определить наиболее критичные элементы конструкции (например, отображаются красным цветом) с подтверждением вывода числовыми значениями параметров.

Недостатком приведенного алгоритма является невозможность вынесения заключений о достоверности результирующей оценки о годности испытуемого образца и невысокая степень автоматизации процесса, приводящая к появлению субъективных ошибок оператора вследствие переутомления или низкой квалификации.

Следующим шагом на пути решения поставленной задачи является обоснование и выбор показателя достоверности  $D$ . «Учитывая отсутствие достаточной статистики, невозможность применения традиционных вероятностных показателей оценки достоверности, предлагается вариант использования нечеткой меры достоверности в виде функций принадлежности (ФП)  $\mu(x)$  [8], где  $x$  — измеряемый параметр, по которому определяется степень истинности заключения “параметр по результатам измерений в допуске” или “образец признается годным”. В этом случае при проведении измерений может быть получена оценка степени истинности заключения “параметр по результатам измерений в допуске” путем преобразования результата измерения в соответствующее значение ФП  $\mu(x) = \mu(X_n, X_v, X_{изм})$ , где  $X_n$ ,  $X_v$  — нижняя и верхняя границы допуска,  $X_{изм}$  — измеренное значение параметра  $X$ . Использование нечеткой меры достоверности позволяет применить для разработки методики нечеткие модификации методов допускового контроля и векторов и деревьев состояний» [6, 9].

Применение нечеткой меры для оценки достоверности заключений о годности предполагает возможность ее определения по результатам ВИ. В этом случае достоверность заключения будет выражена ФП заданного вида, например экспоненциальной, сигмовидной, трапецидальной, треугольной и т. д., зависящей от значений измеренных параметров  $H$ . Например, экспоненциальная функция будет выглядеть следующим образом:  $\mu(h) = \exp(-\alpha h)$ , где  $h$  — измеряемый параметр,  $\alpha$  — нормирующий

коэффициент. Тогда решение о варианте заключения по результатам испытаний может быть найдено в виде

$$f^* = \arg \max_F [\mu^0, \mu^k(H/W)],$$

где  $\mu^0, \mu^k$  — достоверности заключений в нечеткой мере.

Применение нечеткой меры для оценки достоверности заключений о годности предполагает возможность ее определения по результатам ВИ в соответствии с приведенным выше правилом принятия решения. На языке ФП оно будет выглядеть следующим образом:

*если по результатам ВИ корпус работоспособен с достоверностью  $\mu(x)V^{\text{констр}}$  и ЭРИ работоспособны с достоверностью  $\mu(x)V^{\text{ЭРИ}}$ , то изделие в целом работоспособно с достоверностью*

$$\mu(x)V^{\text{изд.}} = \min\{\mu V(x)^{\text{констр}}, \mu V(x)^{\text{ЭРИ}}\}$$

для заданного вида испытаний  $V$ .

В случае проведения всех видов испытаний итоговая оценка достоверности выглядит следующим образом:

$$\mu(x)^{\text{изд.}} = \min(\mu(x)V^{\text{изд.}}).$$

Рассмотрим возможный вариант решения частной задачи ВМИ для оценки целостности корпуса изделия. Примем, что объект испытаний  $S$  характеризуется наличием некоторых конструктивных элементов: граней, разъемов, отдельных узлов, определяющих топологию объекта, образующих множество конструктивных элементов  $\Psi = \{\psi_l\}$ , где  $l = 1, L$ .

Каждый из конструктивных элементов представляется сеточной структурой — матрицей КЭМ, описываемой набором значений измеряемых параметров  $h_{i,j}$ , где  $i, j$  — соответственно номера строк и столбцов матрицы. В результате испытаний по каждому из конструктивных элементов будет получен массив значений  $h_{i,j}$ , который на основании заданного вида ФП преобразуется в массив значений  $\mu_{i,j} = \mu(h_{i,j})$  по каждому номеру  $l$ . Исходя из выбранного принципа пессимизма требуется задание критичных значений  $\mu_{кр}$  и нахождение значений минимальных значений  $\min \mu_{i,j}$ , удовлетворяющих критерию  $\min \mu_{i,j} \leq \mu_{кр}$ . Аналогичная операция проводится для всех конструктивных

элементов  $\Psi$ , результатом является массив значений  $\mu_l$ . Достоверность результирующего заключения может быть представлена как  $\mu_f^* = \min \mu_l$ .

Достоверность итогового заключения будет оцениваться как

$$\mu_f^* = \min_l u_l = \min_l \min_{i,j} u_{i,j}^l.$$

Исходя из принятых обозначений  $\mu_f^* = \mu(x)V^{\text{констр}}$ .

После принятия решения возможна локализация критических мест путем нахождения множества критических элементов конструкции по правилу

$$\Psi_{\text{кр.}} = \arg \mu_l \leq \mu_{\text{кр.}}$$

с указанием соответствующих номеров  $l$ .

В этом случае общий алгоритм методики принятия решения о годности корпуса изделия по результатам ВМИ будет выглядеть так, как представлено на рис. 4. Например, пусть получено множество значений  $\mu_l = \{0,3; 0,4; 0,8; 0,95; 0,2\}$  и задано пороговое значение  $\mu_{\text{кр.}} = 0,7$ . Тогда к числу критических элементов будут относиться элементы с порядковыми номерами 1; 2; 5.

Для каждого из выделенных критических элементов конструкции возможна дальнейшая локализация критических областей самого элемента по правилу  $\min \mu_{i,j} \leq \mu_{\text{кр}}$  и выделением номеров строк и столбцов  $i^*, j^*$  соответствующих матриц.

Аналогичные шаги проводятся для анализа работоспособности ЭРИ. В результате будет получено значение ФП  $\mu(x)V^{\text{ЭРИ}}$ . Тогда, в соответствии с правилом принятия решения,

$$\mu(x)V^{\text{изд.}} = \min\{\mu(x)V^{\text{констр}}, \mu(x)V^{\text{ЭРИ}}\},$$

где  $\mu(x)V^{\text{изд.}} = \mu_f^0$  — достоверность заключения о годности изделия

Окончательное решение принимается по правилу

$$f^* = \arg \max_F [\mu_f^0, \mu_f^k(H/W)].$$

На уровне дихотомии принятия решений: «годен–не годен» можно задать следующее соотношение:  $\mu_f^0 + \mu_f^1 = 1$ . Тогда, например, если в результате испытаний получено заключение «объект по результатам испытаний годен» с достоверностью

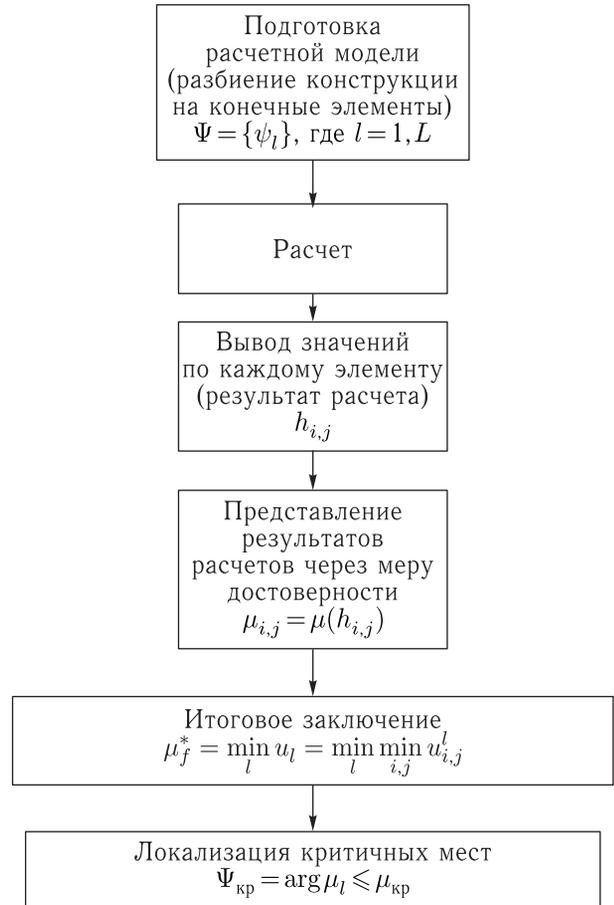


Рис. 4. Алгоритм методики ВИ

$\mu_f^0 = 0,3$ , то решение принимается в пользу «объект по результатам испытаний не годен» с  $\mu_f^1 = 0,7$ .

Одним из наиболее существенных вопросов при реализации алгоритма методики является выбор вида ФП и ее параметров. Учитывая возможную неадекватность ЦДИ реальному объекту, правильный выбор ФП позволит обеспечить соответствие полученного на ВИ результата испытаниям натурным. Поэтому в дальнейшем предполагается уточнение ФП ввиду несоответствия результатов натурных и ВИ, с последующим определением коэффициентов преобразования для ФП по результатам натурных испытаний.

**Пример реализации.** Приведем пример реализации предлагаемого алгоритма для определения прочности конструкции рамки известного прибора с применением ФП трапецидального вида. Внешний вид рамки и результаты оценки (точки на выбранной ФП) представлены на рис. 5.

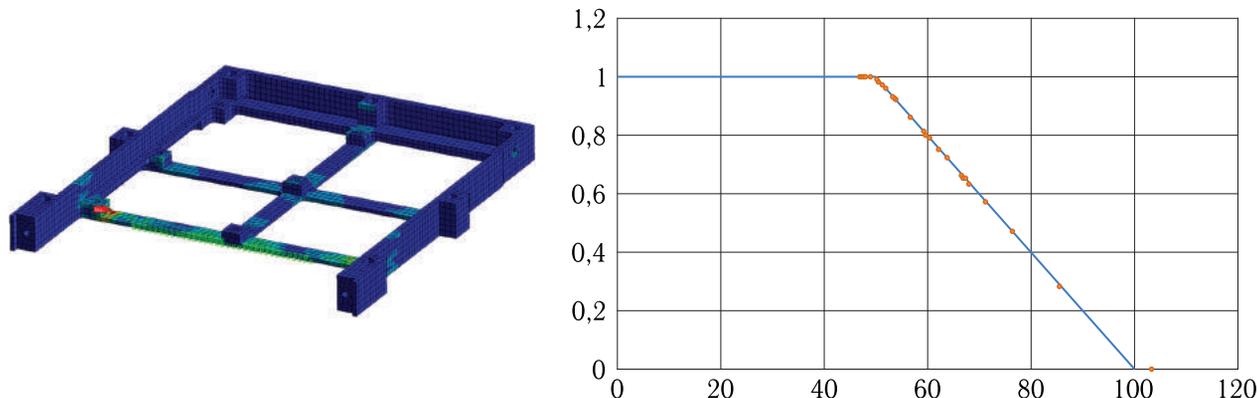


Рис. 5. ФП для анализа прочности конструкции рамки прибора

Критерием годности в данном случае является предел текучести и предел прочности по напряжениям, составляющие 50 и 100 МПа соответственно (значения не соответствуют действительным для используемого материала и выбраны исключительно для наглядной демонстрации работы алгоритма).

Если ячейка массива расчетных данных принимает значение  $\leq 50$  МПа, то принимается заключение «объект по результатам испытаний не годен» с достоверностью  $\mu_f^1 = 0$  и заключение «объект по результатам испытаний годен» с достоверностью  $\mu_f^0 = 1$ .

Если ячейка массива расчетных данных принимает значение  $\geq 100$  МПа, то принимается заключение «объект по результатам испытаний годен» с достоверностью  $\mu_f^0 = 0$  и заключение «объект по результатам испытаний не годен» с достоверностью  $\mu_f^1 = 1$ .

Промежуточные значения достоверности приняты с линейным распределением в указанном интервале значений (для повышения точности заключения о результатах ВИ необходимо применять кривые распределения, полученные при испытаниях на растяжение образцов материалов).

Для обработки результатов расчета экспортируем массив данных в программу Excel, включающий в себя информацию о значениях напряжений в каждом расчетном узле объекта. Данная рамка содержит в себе 8355 расчетных узлов, значения напряжений и номера которых были учтены при расчете. После обработки данных по представленному алгоритму получаем ФП для нескольких узлов с наименьшей достоверностью.

Результаты ВМИ зависят от варианта размещения виртуальных датчиков (ВД) на ЦД. Предлагается определять рациональную топологию размещения ВД на модели прибора перебором различных вариантов размещения ВД при проведении ВМИ либо натуральных испытаний, что повышает достоверность результатов. Возможно также внесение избыточности при моделировании размещения ВД на ЦД. После проведения ВМИ из избыточного числа ВД выбирают наиболее информативные и определяют рациональную топологию размещения ВД на ЦД создаваемого прибора. Параметром адекватности ЦД можно считать кучность оценок достоверностей нескольких узлов. Для подтверждения адекватности модели в данном случае необходимо, чтобы как минимум 2 узла с наибольшими напряжениями принимали близкие друг к другу значения.

Для повышения точности необходима доработка расчетной модели: повышение разрешения сетки в проблемном месте и проведение серии испытаний, пока кучность достоверности не достигнет адекватного уровня. В случае если кучность результатов, наоборот, расходится, то это означает ошибку: результат расчета в данной точке стремится к бесконечности или неопределенности (сингулярность) и ее необходимо исключать из анализа.

Данный подход позволяет выбирать варианты размещения ВД на ЦД конструкции (прибора) и получать результаты, по которым, в свою очередь, определять наилучшее их размещение. Выбор топологии размещения ВД позволяет при низкой степени адекватности модели прибора проводить ВМИ и натурные испытаний с более высоким качеством.

Приведенный пример рассматривает только оценку целостности конструкции с получением  $\mu(x)V^{\text{констр}}$ . Для вынесения окончательного заключения требуется оценка работоспособности ЭРИ с получением  $\mu(x)V^{\text{изд}}$ . Указанные вопросы частично были рассмотрены в работе [6] и требуют дальнейшего исследования.

## Заключение

В настоящей статье рассмотрены вопросы автоматизации процесса ВИ изделий РЭА. На основании анализа особенностей содержания процесса и ВИ сформулирована цель и выполнена постановка задачи разработки методики автоматизированной обработки результатов ВИ изделий РЭА, позволяющей выносить обоснованные заключения о годности изделий с указанием достоверности заключения. Получено общее решение, в основе которого лежат методы нечеткого контроля, предполагающие использование функций принадлежности в качестве меры достоверности. Приведен алгоритм методики, пример ее реализации для ВМИ, а также предложения по повышению точности результатов.

Дальнейшим направлением исследований является разработка научно-обоснованных предложений по учету топологии размещения виртуальных датчиков на ЦДИ, что позволит повысить наблюдаемость объекта испытаний и обоснованность выносимых решений.

Представляется, что предлагаемая методика автоматизированной обработки результатов ВИ изделий РЭА с использованием нечеткой меры позволит обеспечить требуемое качество испытаний элементов РЭА при производстве изделий РКТ.

## Список литературы

1. Ерохин Г.А., Жуков А.А., Соловьев В.А., Самитов Р.М., Тюлин А.Е., Хромов О.Е., Чурило И.В. Испытания бортовой аппаратуры космического назначения. Часть 1. Синергизм воздействия факторов космического пространства // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2023, т. 10, вып. 1.
2. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. Национальный стандарт Российской Федерации. Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. № 9 979-ст. Разработан ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого. М.: Стандартинформ, 2021. 10 с.
3. Рябогин Н.В., Ерохин Г.А., Пронина Е.Б., Кошелев А.Ю. Модельно-ориентированный системный инжиниринг как основа обеспечения разработки и создания перспективных космических систем и комплексов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2020, т. 7, вып. 3. С. 51–60.
4. Новая парадигма. Цифровые двойники — стратегия инновационного прорыва в ОПК <https://dfnc.ru/archiv-zhurnalov/2020-4-63/novaya-paradigma-tsifrovye-dvojniki-strategiya-innovatsionnogo-proryva-v-opk/> (Дата обращения 10.07.2023).
5. Виртуальные испытания цифровых двойников и цифровой паспорт материала: что Вы об этом знаете? <https://integral-russia.ru/2021/09/16/virtualnye-ispytaniya-tsifrovyyh-dvojnikov-i-tsifrovoj-pasport-materiala-chto-vy-ob-etom-znaete/> (Дата обращения 10.07.2023).
6. Яхутин С.А. Виртуальные механические испытания объектов ракетно-космической техники с использованием цифровых двойников // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2021, т. 8, вып. 3.
7. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH. СамГТУ, 2010. 271 с.
8. Прикладные нечеткие системы / Пер. с япон.; Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. М.: Мир, 1993. 368 с.
9. Потюпкин А.Ю. Применение нечеткой меры в задачах контроля технического состояния летательных аппаратов // Измерительная техника, 2002, № 7.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 19.07.2023  
Дата принятия рукописи  
в печать 02.11.2023