

<https://vestnikmephi.elpub.ru>

# ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»



# ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»

Том 11 № 6 2022 НОЯБРЬ - ДЕКАБРЬ

Основан в июле 2012 г.  
Выходит 6 раз в год  
ISSN: 2304-487X

**Главный редактор**  
М.Н. Стриханов

**Редакционная коллегия:**

А.В. Аксёнов, Pavel Bedrikovetsky,  
А.М. Гальпер, С.Г. Гаранин, Vladimir S. Gerjikov, Н.Н. Евтихийев,  
Yalchin Efendiev, Alexei I. Zhurov, Н.П. Калашников, Н.И. Каргин,  
С.А. Кащенко, О.Н. Крохин,  
Н.А. Кудряшов (*заместитель главного редактора*),  
Raytcho Lazarov, А.И. Маймистов, О.В. Нагорнов, А.Д. Полянин,  
В.В. Цегельник, Б.Н. Четверушкин,  
М.А. Чмыхов (*ответственный секретарь*), William E. Schiesser

*Адрес редакции:* 115409, Москва, Каширское ш., 31,  
Вестник НИЯУ МИФИ  
Интернет: <https://vestnikmephi.elpub.ru>  
Электронная почта: [vestnik@mephi.ru](mailto:vestnik@mephi.ru)

**Москва**  
**НИЯУ МИФИ**

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 11, № 6, 2022

---

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

**Параметрическая идентификация коэффициента теплопроводности при высокоинтенсивном теплом нагреве с учетом термического разложения**

*Н.О. Борщев*

390

---

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

**Моделирование работы нелинейной системы амортизации и демпфирования бесплатформенного инерциального измерительного прибора**

*П.А. Илюшин, В.П. Наумченко, Д.Г. Пикунов, А.В. Соловьёв*

403

**Разработка виртуального тренажера для обучения персонала по сборке тепловыделяющих элементов для атомной станции ВВЭР-1000**

*Д.Г. Ковалёнок, А.О. Толоконский*

413

**Оценка влияния шумов инерциальных датчиков на точность выставки гироскопа**

*В.П. Наумченко, П.А. Илюшин, Д.Г. Пикунов, А.В. Соловьёв*

425

---

## ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

**Сравнительный анализ методов деревьев решений и нейронных сетей в задаче классификации кредитных организаций**

*Е.П. Акишина, В.В. Иванов, А.В. Крянев, А.С. Приказчикова*

442

---

## АВТОМАТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

**Датчик температуры на поверхностных акустических волнах на основе линии задержки и резонатора**

*В.О. Кислицын, Г.Я. Карапетьян, В.Ф. Катаев, Б.М. Середин, Н.В. Ермолаева*

450

# Contents

---

---

Volume 11, Number 6, 2022

---

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS

**Parametric identification of the thermal conductivity coefficient  
under high-intensity heat heating, taking into account thermal decomposition**

*N.O. Borshchev*

390

---

## MATHEMATICAL MODELS AND NUMERICAL METHODS

**Modeling of the nonlinear system of damping and damping  
of a strapless inertial measuring device**

*P.A. Ilyushin, V.P. Naumchenko, D.G. Pikunov, A.V. Soloviev*

403

**Development of a virtual simulator for training personnel  
in assembling fuel elements for VVER-1000 nuclear plant**

*D.G. Kovalionok, A.O. Tolokonskiy*

413

**The noises influence estimation of inertial sensors on the accuracy  
of the gyroscopic platform exhibition**

*V.P. Naumchenko, P.A. Ilyushin, D.G. Pikunov, A.V. Soloviev*

425

---

## APPLIED MATHEMATICS AND COMPUTER SCIENCE

**The comparative analysis of decision trees and neural networks methods  
in the credit institutions classification problem**

*E.P. Akishina, V.V. Ivanov, A.V. Kryanev, A.S. Prikazchikova*

442

---

## AUTOMATION AND ELECTRONICS

**Surface acoustic wave temperature sensor based on delay line and resonator**

*V.O. Kislitsyn, G.Ya. Karapetyan, V.F. Kataev, B.M. Seredin, N.V. Ermolaeva*

450

УДК 62-533.65

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ ТЕПЛОМ НАГРЕВЕ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

© 2022 Н.О. Борщев

*Астрокосмический центр Федерального государственного учреждения науки,  
Институт им. С.А. Лебедева, Москва, 119991, Россия*

*\*e-mail: moriarty93@mail.ru*

Поступила в редакцию: 27.01.2023

После доработки: 11.02.2023

Принята к публикации: 14.02.2023

Одной из первостепенных задач теплового проектирования является составление адекватной тепловой физико-математической модели в обеспечении его штатного теплового режима. В данной работе рассматривается последовательный метод определения комплекса теплофизических характеристик как функций от температуры при его наземной тепловой обработке в естественных условиях. Объект испытаний подвергается высокоинтенсивному тепловому однонаправленному нагреву, что характерно при спуске и выходе космических аппаратов из атмосферы различных планет. Данная задача решается как задача по поиску глобального минимума из минимизации среднеквадратичной ошибки между теоретическим и экспериментальным полем температур. В качестве метода минимизации выбран алгоритм сопряженных направлений, как наиболее точный метод первого порядка сходимости. При проектировании теплового режима конструкций необходимо иметь представление о начально-граничных условиях изделия, а также его теплофизических характеристик. Таким образом, определение коэффициента теплопроводности материала – целевая задача в обеспечении штатного теплового режима изделия.

*Ключевые слова:* метод итерационной регуляризации, коэффициент теплопроводности материала, метод сопряженных направлений, среднеквадратичная ошибка.

**DOI:** <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.19>

### ВВЕДЕНИЕ

При спуске и выходе ракет-носителей или спускаемых космических аппаратов из плотных слоев атмосферы различных планет на них действует высокоэнтальпийный газовый поток, в результате чего происходят процессы абляции, горения, уноса массы и т.д. [1–6]. Для обеспечения штатного эксплуатационного температурного режима изделия необходимо сформировать массив исходных данных в виде начально-граничных условий, а также теплофизических характеристик. Наиболее эффективными методами определения данных характеристик являются методы параметрической идентификации параметризованных величин исследуемых параметров на основе минимизации среднеквадратичной ошибки между теоретическим массивом входной информации и экспериментальным. Значительный вклад в развитии этих методов решения обратных задач теплопроводности внесли такие люди, как О.М. Алифанов, А.В. Ненарокомов, Е.А. Сенкевич.

Таким образом, цель данной работы – определение теплопроводящей характеристики теплоизоляционного материала как функции от температуры на основе замеров температур в местах установки термодатчиков. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью обеспечения штатного теплового режима изделий, подверженных высокоэнтальпийному нагреву.

### ПОСТАНОВКА «ПРЯМОЙ» ЗАДАЧИ НАХОЖДЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Процесс распространения тепла внутри твердого изотропного материала при сверхкритическом тепловом нагреве описывается гиперболическим волновым уравнением Верно, где идет учет релаксации теплового потока. Также процесс высокоэнтальпийного теплового нагрева может сопровождаться тепловым разложением материала, изменением его габаритов и кинетики. Тепловая физико-математическая модель для такого рода испытаний образца будет иметь вид:

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ ТЕПЛОМ НАГРЕВЕ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

при  $T(x, \tau) < T_{кр}$

$$C_{эф}(T)\rho \left[ \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right] = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{эф}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right]; T(0) = T_0;$$

при  $T(x, \tau) \geq T_{кр}$

$$C_{эф}(T) \left( \rho_{\infty} - \int_0^{\tau} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} d\tau \right) \times \\ \times \left[ \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right] = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{эф}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] + \Delta H \frac{\partial \rho}{\partial \tau}, \\ T(0) = T_0.$$

Уравнение кинетики термического разложения в предположении справедливости закона Аррениуса и учета темпа нагрева имеет вид:

$$\frac{d \ln \left( \frac{\rho}{\rho_{\infty}} \right)}{d\tau} = \\ = -K_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \left( 1 + \frac{E_a}{RT^2} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} (\tau - \tau_0) \right),$$

$E_a$  – энергия активации, Дж;  $K_0$  – константа химической реакции;  $\Delta H$  – тепловой эффект реакции термического разложения, Дж.

Граничные условия будут иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \\ \lambda_{эф}(T) \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial x} = q_{сум} + \tau_p \frac{\partial q_{сум}(l_x, \tau)}{\partial \tau}, \\ q_{сум} = q_{пад} - \alpha_k(T)(T(l_x, \tau) - T_{ср}) - \\ - (\varepsilon(T)\sigma T(l_x, \tau)^4 - T_{ср}^4), \\ \frac{\partial q_{сум}(l_x, \tau)}{\partial \tau} = - \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial \tau} \times \\ \times \left[ \frac{\partial \alpha_k(T)}{\partial T} (T(l_x, \tau) - T_{ср}) + \alpha_k(T) \right] - \\ - 4\varepsilon(T)\sigma T(l_x, \tau)^3 \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial \tau}.$$

В данной постановке задачи:

$\lambda_{эф}(T)$  – коэффициент теплопроводности материала,  $\frac{Вт}{мК}$ ;

$T(x, \tau)$  – температура в точке К;

$\varepsilon(T)$  – отражательно-излучательная характеристика;

$\tau_p$  – коэффициент затухания волны,  $\frac{с}{К}$ ;

$\alpha_k(T)$  – коэффициент теплоотдачи материала,  $\frac{Вт}{м^2К}$ ;

$q_{пад}$  – падающий удельный тепловой поток,  $\frac{Вт}{м^2}$ ;

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2К^4};$$

$C_{эф}(T)$  – удельная теплоемкость материала,  $\frac{Дж}{кгК}$ ;

$\rho$  – плотность материала,  $\frac{кг}{м^3}$ ;

Выражение для эффективного падающего теплового потока определяется как [4]

$$q_{пад}(\tau) = \sum_j \frac{\varepsilon_j}{F_j} q_j(\tau) \int_{F_j} \int_{F_i} \frac{\cos(\omega_{ij}) \cos(\omega_{ji})}{\pi l_{ij}^2} dF_j + \\ + \sum_j \frac{r_j}{F_j} q_{пад}(\tau) \int_{F_j} \int_{F_i} \frac{\cos(\omega_{ij}) \cos(\omega_{ji})}{\pi l_{ij}^2} dF_j,$$

где  $F_j$  – эффективные площади теплообмена,  $м^2$ .

Коэффициент отражения связан с отражательно-излучательной характеристикой выражением:

$$r_j = 1 - \varepsilon_j.$$

Коэффициент теплоотдачи материала к окружающей среде определяется из зависимости для плоской стенки

$$\alpha_k(T) = Nu_l(T) \frac{\lambda_b(T_c)}{l_{эф}},$$

где  $\lambda_b$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\frac{Вт}{мК}$ ;  $l_{эф}$  – характерный размер (размер,

вдоль которого движется тепловой конвективный поток), м;  $T_c$  – температура окружающей среды, К;  $Nu_l(T)$  – критерий Нуссельта.

Исследуемую теплофизическую характеристику представим в виде

$$\lambda_{эф}(T) \approx \sum_{m=1}^M \lambda_p N_m(T),$$

где  $N_m(T)$  – базисные функции, описывающие зависимость искомых теплофизических характеристик от температуры.

В данной работе используются линейно-непрерывные базисные функции, имеющие следующий вид:

$$N_m^\lambda(T) = \begin{cases} 0, T < T_{m-1}, \\ \frac{T - T_{m-1}}{T_m - T_{m-1}}, T_{m-1} \leq T \leq T_m, \\ \frac{T_{m+1} - T}{T_{m+1} - T_m}, T_{m-1} \leq T \leq T_m, \\ 0, T > T_m, m = \overline{1, M}. \end{cases}$$

Рассмотрим восстановление искомым характеристикам на основе среднеквадратичного функционала невязки между теоретическим и экспериментальным полем температур

$$S(\lambda_p) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{i=1}^M [T(\lambda_p) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau})]^2 d\tau.$$

В работе используется метод безусловной минимизации функционала  $S(\lambda_p)$  с помощью метода сопряженных градиентов, как наиболее точного метода первого порядка точности, позволяющего достичь требуемой сходимости за минимальное число итераций.

Последовательный алгоритм метода сопряженных градиентов можно представить в следующем виде [5–8]:

$$\vec{\lambda}^{n+1} = \vec{\lambda}^n + \Delta \vec{\lambda}^{n+1},$$

$$\text{где } \Delta \vec{\lambda}^{n+1} = -\beta_n p^{(n)}.$$

Направление спуска определяется из

$$\vec{p}^n = \text{grad}S(\vec{\lambda}^n) + \beta_n \vec{p}^{n-1},$$

$$\begin{aligned} S(\lambda_p) = & \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{i=1}^M [T(\lambda_p) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau})]^2 d\tau + \int_0^{l_x} \int_0^{\tau_{\max}} \psi(x, \tau) \left[ C_{\text{эф}}(T) \rho \left[ \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] + \Delta H \frac{\partial \rho}{\partial \tau} dx \right] dx d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_{\max}} \xi(l_x, \tau) \left[ \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial x} + q_{\text{пад}} - \alpha_k(T)(T - T_{\text{ср}}) + \varepsilon \sigma T^4 + \right. \\ & \left. - \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial \tau} \left[ \frac{\partial \alpha_k(T)}{\partial T} (T - T_{\text{ср}}) + \alpha_k(T) \right] - 4\varepsilon(T) \sigma T(l_x, \tau)^3 \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial \tau} \right] d\tau. \end{aligned}$$

Для нахождения компоненты теплопроводности сообщим элементарные приращения искомым величин рассматриваемым теплофизическим характеристикам. Получим следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{эф}}(T + \Delta T) & \approx (1 + \Delta) \sum_{m=1}^M \lambda_p N_m(T + \Delta T) = \\ & = (1 + \Delta) \sum_{m=1}^M \lambda_p \left[ N_m(T) + \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} \Delta T \right]. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_0 & = 0, p^{(0)} = \text{grad}S(\lambda^{(0)}), \\ \beta_n & = \frac{|\text{grad}S(\lambda^{(n)})|^2}{|\text{grad}S(\lambda^{(n-1)})|^2}. \end{aligned}$$

Критерием останова итерационного процесса является выражение:

$$|\text{grad}S(\lambda^{(0)})| = \sqrt{\left\{ \sum_{p=1}^3 \left[ \frac{\partial S(\lambda^{(n)})}{\partial \lambda_p} \right]^2 \right\}} \leq \delta_{\text{sum}},$$

где  $\delta_{\text{sum}}$  – погрешность входных данных, вычисленная в той же метрике, что и целевой функционал:

$$\delta_{\text{sum}} = \delta_a + \delta_f + \delta_{\text{окр}},$$

где  $\delta_f$  – погрешность входных температур, определяемая следующими выражением:

$$\delta_f = \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \delta_L(\tau) d\tau.$$

#### ПОИСК КОМПОНЕНТЫ ГРАДИЕНТА СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЙ ОШИБКИ

Для определения компонент градиента целевого функционала воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. Для этого запишем обобщенный функционал Лагранжа с ограничениями в виде зашумленного уравнения теплопроводности и его граничных условий [9–16]:

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ ТЕПЛОМ НАГРЕВЕ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Таким образом, при подстановке данных компонент получим возмущенное уравнение теплопроводности:

при  $T(x, \tau) < T_{кр}$

$$\begin{aligned} & \left[ C(T) + \frac{\partial C(T)}{\partial T} dT \right] \rho \left[ \frac{\partial [T(x, \tau) + \Delta T(x, \tau)]}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 [T(x, \tau) + \Delta T(x, \tau)]}{\partial \tau^2} \right] = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left[ \lambda_{эф}(T) + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} dT \right] \frac{\partial T(x, \tau) + \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \right]; \end{aligned}$$

при  $T(x, \tau) \geq T_{кр}$

$$\begin{aligned} & \left[ C(T) + \frac{\partial C(T)}{\partial T} dT \right] \rho \left[ \frac{\partial [T(x, \tau) + \Delta T(x, \tau)]}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 [T(x, \tau) + \Delta T(x, \tau)]}{\partial \tau^2} \right] = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left[ \lambda_{эф}(T) + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} dT \right] \frac{\partial T(x, \tau) + \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \right] + \\ & + \left( \Delta H + \frac{\partial \Delta H}{\partial T} \Delta T \right) \left( \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial \tau \partial T} \Delta T \right). \end{aligned}$$

Возмущенные граничные условия примут следующий вид:

$$\begin{aligned} T(0) = T_0 + \Delta T; & \left[ \lambda_{эф}(T) + \frac{\partial \lambda_{эф}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} dT \right] \frac{\partial T(l_x, \tau) + \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} = \\ & = \left[ \alpha_{кр}(T) + \frac{\partial \alpha_{кр}(T)}{\partial T} dT \right] (T(l_x, \tau) + \Delta T(l_x, \tau) - T_{ср}) + \frac{q_{пад}}{(1 + \Delta)} - (\sigma T(l_x, \tau)^4 + \\ & + 4\sigma T(l_x, \tau)^3 \Delta T(l_x, \tau)) - \frac{\partial T(l_x, \tau) + \Delta T(l_x, \tau)}{\partial \tau} \left[ \frac{\partial \alpha_{кр}(T)}{\partial T} (T + \Delta T(l_x, \tau) - T_{ср}) + \alpha_{кр}(T) \right] - \\ & - 4 \sum_{i=1}^M \varepsilon_p \left[ N_m(T) + \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} dT \right] \sigma [T(l_x, \tau)^3 + 3T(l_x, \tau)^2 \Delta T(l_x, \tau)] \frac{\partial T(l_x, \tau) + \Delta T(l_x, \tau)}{\partial \tau}. \end{aligned}$$

Для получения выражения относительно вариации температуры вычтем из возмущенного уравнения теплопроводности невозмущенное, отбросив вторые производные вариаций температур в силу их малости. Получим:

при  $T(x, \tau) < T_{кр}$

$$\rho \left[ C(T) \frac{\Delta T(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial C(T)}{\partial T} \left[ T(x, \tau) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right] \right] dT = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} dT \right].$$

при  $T(x, \tau) \geq T_{кр}$

$$\begin{aligned} & \rho \left[ C(T) \frac{\Delta T(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial C(T)}{\partial T} \left[ T(x, \tau) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right] \right] dT = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} dT \right] + \frac{\partial \Delta H}{\partial T} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \Delta T + \frac{\partial^2 \rho}{\partial \tau \partial T} \Delta H \Delta T, \end{aligned}$$

где

$$\frac{d^2 \ln \left( \frac{\rho}{\rho_\infty} \right)}{d\tau dT} = \frac{E_a}{RT^2} K_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \left( 1 + \frac{E_a}{RT^2} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} (\tau - \tau_0) \right) - K_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \left( 1 - \frac{E_a}{RT^3} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} (\tau - \tau_0) \right).$$

Граничные условия примут вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Delta T(0, \tau)}{\partial x} = 0; \\ & \lambda_{эф}(T) \frac{\partial \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_{эф}(T)}{\partial T} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} dT = \alpha_{кр}(T) \Delta T(l_x, \tau) + \frac{\partial \alpha_{кр}(T)}{\partial T} T_{ср} dT + \frac{q_{пад}}{(1 + \Delta)} - 4\sigma T^3 \Delta T(l_x, \tau). \end{aligned}$$

Запишем теперь вариацию целевого функционала:

$$\begin{aligned} \delta S(\lambda_p) = & \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{i=1}^M [T(\lambda_p) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau})] \Delta T(x, \tau) d\tau + \int_0^{l_x} \int_0^{\tau_{\max}} \psi(x, \tau) \times \\ & \times \left[ \rho \left[ C(T) \frac{\Delta T(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial C(T)}{\partial T} \left[ \frac{T(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right] dT \right] - \right. \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} dT \right] dx d\tau + \frac{\partial \Delta H}{\partial T} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \Delta T + \\ & + \frac{\partial^2 \rho}{\partial \tau \partial T} \Delta H \Delta T \Big] dx d\tau + \int_0^{\tau_{\max}} \xi(l_x, \tau) \left[ \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} dT - \right. \\ & \left. - \alpha_{\kappa}(T) \Delta T(l_x, \tau) + \frac{\partial \alpha_{\kappa}(T)}{\partial T} T_{\text{cp}} dT + \frac{q_{\text{пад}}}{(1 + \Delta)} - 4\sigma T^3 \Delta T(l_x, \tau) \right] dx d\tau. \end{aligned}$$

Избавимся от знака повторного дифференцирования для выражения:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\tau_{\max}} \psi(x, \tau) \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \right] = \psi(x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_0^{l_x} - \\ & - \int_0^{l_x} \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} dx = \psi(x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_0^{l_x} - \\ & - \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) \Delta T(x, \tau) \Big|_0^{l_x} + \\ & + \int_0^{l_x} \left[ \frac{\partial^2 \psi(x, \tau)}{\partial x^2} \lambda_{\text{эф}}(T) \Delta T(x, \tau) + \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Delta T(x, \tau) \right] dx. \end{aligned}$$

Запишем теперь новый вид функционала с учетом сделанного преобразования:

$$\begin{aligned} \delta S(\lambda_p) = & \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{i=1}^M [T(\lambda_p) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau})] \Delta T(x, \tau) d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_{\max}} \int_0^{l_x} \left[ \frac{\partial^2 \psi(x, \tau)}{\partial x^2} \lambda_{\text{эф}}(T) \Delta T(x, \tau) + \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Delta T(x, \tau) \right] dx d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_{\max}} \int_0^{l_x} \left[ \frac{\partial \Delta H}{\partial T} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \Delta T + \frac{\partial^2 \rho}{\partial \tau \partial T} \Delta H \Delta T \right] dx d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_{\max}} \psi(x, \tau) \left[ \rho \left[ C(T) \frac{\Delta T(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial C(T)}{\partial T} \left[ \frac{T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right] dT \right] - \right. \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Delta T \right] d\tau + \\ & \left. \int_0^{\tau_{\max}} \left[ \psi(x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_0^{l_x} - \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) \Delta T(x, \tau) \Big|_0^{l_x} \right] d\tau + \end{aligned}$$

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ ТЕПЛОМ НАГРЕВЕ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

$$+ \int_0^{\tau_{\max}} \xi(l_x, \tau) \left[ \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} dT - \right. \\ \left. - \alpha_{\kappa}(T) \Delta T(l_x, \tau) + \frac{\partial \alpha_{\kappa}(T)}{\partial T} T_{\text{ср}} dT + \frac{q_{\text{пад}}}{(1 + \Delta)} - 4\sigma T(l_x, \tau)^3 \Delta T(l_x, \tau) \right] d\tau.$$

Для нахождения трех неопределенных множителей Лагранжа перегруппируем члены, стоящие перед вариацией температуры и производной от вариации по температуре и приравняем их к нулю. Получим:

$$\Delta T(x, \tau): - \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) + \psi(x, \tau) \rho \frac{\partial C(T)}{\partial T} \left[ \frac{T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right] + \\ + \frac{\partial \Delta H}{\partial T} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \Delta T + \frac{\partial^2 \rho}{\partial \tau \partial T} \Delta H \Delta T = 0, \\ \Delta T(l_x, \tau): \xi(l_x, \tau) \left[ \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial^2 T(l_x, \tau)}{\partial x^2} - \alpha_{\kappa}(T) + \frac{\partial \alpha_{\kappa}(T)}{\partial T} T_{\text{ср}} - 4\sigma T(l_x, \tau)^3 \right] - \frac{\partial \psi(l_x, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) = 0, \\ \Delta T(0, \tau): \frac{\partial \psi(0, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) = 0, \\ \frac{\partial \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x}: \psi(x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) + \xi(l_x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) = 0.$$

Теперь для отыскания компоненты градиента целевого функционала запишем вариацию уравнения теплопроводности в другом виде:

При  $T(x, \tau) < T_{\text{кр}}$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \Delta \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] = C(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \Delta C(T) \left( \frac{T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right).$$

при  $T(x, \tau) \geq T_{\text{кр}}$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \Delta \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] = C(T) \left[ \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \right. \\ \left. + \Delta C(T) \left( \frac{T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right) + \frac{\partial \Delta H}{\partial T} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \Delta T + \frac{\partial^2 \rho}{\partial \tau \partial T} \Delta H \Delta T \right] dx d\tau.$$

Граничные условия примут вид

$$\Delta \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(0, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$\Delta \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial x} + \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\kappa}(T) \Delta T(l_x, \tau) + \frac{\partial \alpha_{\kappa}(T)}{\partial T} T_{\text{ср}} dT + \frac{q_{\text{пад}}}{(1 + \Delta)} - 4\sigma T(T)^3 \Delta T(l_x, \tau).$$

Тогда вариация функционала может быть записана в виде

$$\delta S(\lambda_p) = \int_0^{\tau_{\max}} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \lambda_p} \Delta \lambda_p + \int_0^{l_x} \int_0^{\tau_{\max}} \left[ \left[ \psi(x, \tau) \Delta C(T) \left( \frac{T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right) + C(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \Delta \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] \right] dx d\tau + \frac{\partial \Delta H}{\partial T} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \Delta T + \frac{\partial^2 \rho}{\partial \tau \partial T} \Delta H \Delta T \right] dx d\tau +$$

$$+ \int_0^{\tau_{\max}} \xi(l_x, \tau) \left[ \Delta\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial x} + \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} - \right. \\ \left. - \alpha_k(T) \Delta T(l_x, \tau) + \frac{\partial \alpha_k(T)}{\partial T} T_{\text{ср}} dT + \frac{q_{\text{пад}}}{(1 + \Delta)} - 4\sigma T(T)^3 \Delta T(l_x, \tau) \right] d\tau.$$

Группируя члены относительно вариации коэффициента теплопроводности, получим ана-

литическое выражение для нахождения компоненты градиента целевого функционала:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \lambda_p} = - \int_0^{\tau_{\max}} \int_0^{l_x} \left[ \psi(x, \tau) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} dx + \xi(l_x, \tau) \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial x} \right] d\tau.$$

Для нахождения шага спуска, используемого в методе сопряженных направлений, исходя из метода итерационной регуляризации [10, 11],

запишем выражение целевого функционала на следующей итерации:

$$S(\lambda_p + \Delta\lambda_p) = S(\lambda_p) - \alpha_{\text{сп}} \left[ \frac{\partial S(\lambda_p)}{\partial \lambda_p} \right]^2,$$

$$S(\lambda_p + \Delta\lambda_p) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_{\max}} \left[ T(\lambda_p) - \alpha_{\text{сп}} \frac{\partial T(\lambda_p)}{\partial \lambda_p} \right]^2 - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau})]^2 d\tau.$$

Откуда, согласно принципу глобального минимума, необходимо и достаточно приравнять

полученное выражение к нулю и выразить шаг спуска [16–22]. Получим:

$$\alpha_{\text{сп}} = \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_{\max}} \frac{T(\lambda_p) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau})}{\frac{\partial T(\lambda_p)}{\partial \lambda_p}} d\tau.$$

Таким образом, можно сформулировать принцип работы данного алгоритма идентификации теплофизических параметров. Суть его заключается в следующем.

ные функции, считается что зависимости получены, иначе процесс 1–5 выполняется повторно.

Реализация решения данного алгоритма проиллюстрирована на рис. 1.

1. Решается «прямая» задача прогрева конструкции при реализации граничных условий, характерных для условий теплового нагружения изделия.

2. Далее после результатов теплофизических испытаний составляется среднерегуляризуемая интегральная ошибка между теоретическим и экспериментальным полем температур в зонах установки датчиков температур.

3. Решается задача оптимизации данного функционала при предварительном вычислении компонент градиентов параметризованных целевых функций.

4. Ищется шаг спуска в методе «сопряженных» направлений, обеспечивающий минимум целевого функционала на следующей итерации.

5. Получаются значения целевых функций на следующей итерации. При выполнении условия останова, полученные значения каждого из блоков, домножаются на свои характерные базис-

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНОЙ ТЕПЛОВОЙ ОТРАБОТКИ

В эксперименте рассматривается образец в виде парраллелепипеда, по толщине которого установлено три термопары. Все его поверхности теплоизолированы, кроме верхнего основания, на которое падает лучистый интегральный тепловой поток. Таким образом, реализуется одномерный прогрев по толщине материала, моделирующий заданную постановку задачи. В качестве источника теплового потока используется медный линейчатый нагреватель. Схема упрощенной тепловой модели изображена на рис. 1 и в работе [12].

Падающая тепловая нагрузка, моделирующая спуск в атмосфере представлена рис. 2 [13], а полученные при этом температуры в местах установки датчиков на рис. 3.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ ТЕПЛОМ НАГРЕВЕ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

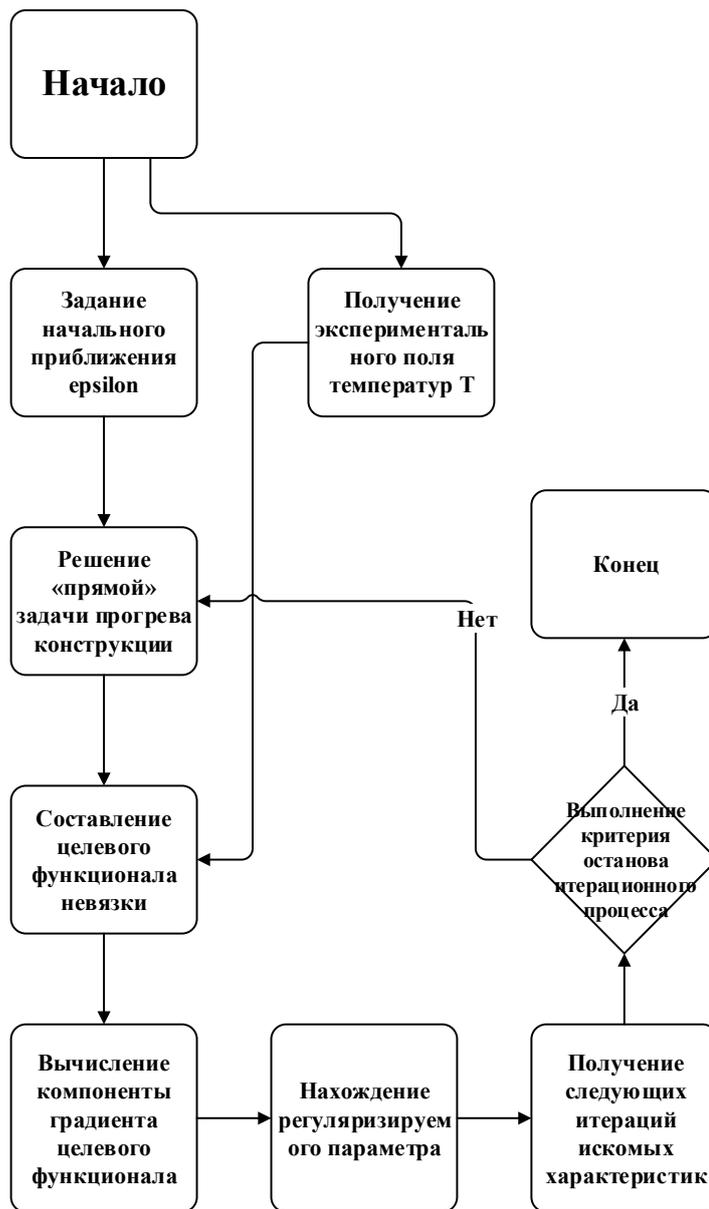


Рис. 1. Блок схема алгоритма идентификации искоемых теплофизических параметров

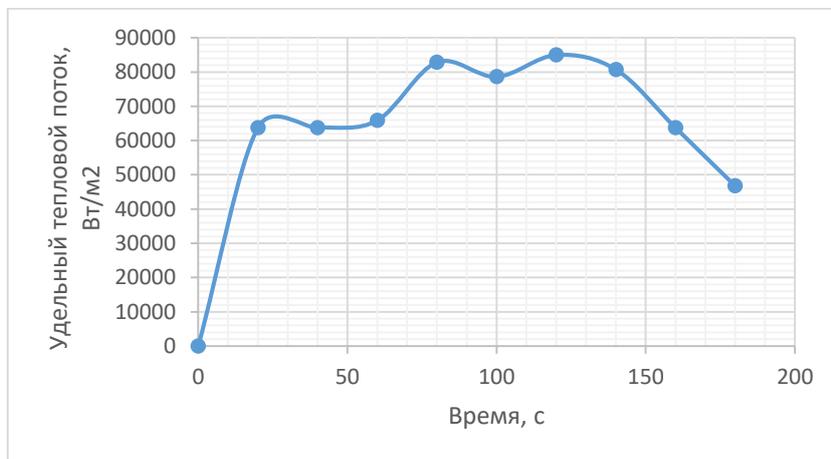


Рис. 2. Удельный тепловой падающий поток

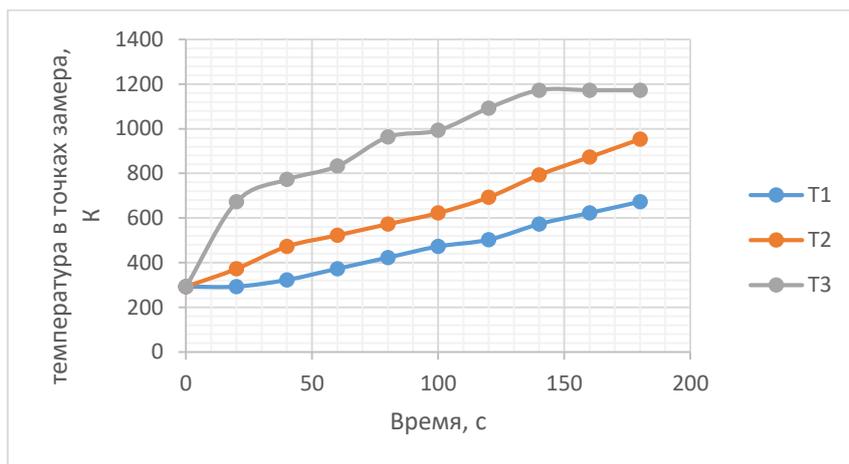


Рис. 3. Экспериментальное температурное поле в местах установки датчиков температур

### РЕЗУЛЬТАТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА

На рис. 4 представлены значения среднеквадратичной ошибки, по которой наглядно видна сходимость теоретического температурного поля к экспериментальному в местах установки датчиков температур.

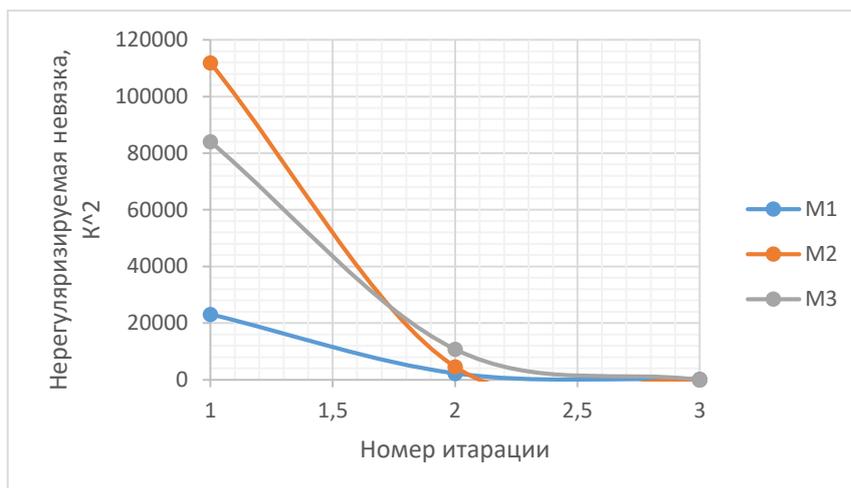


Рис. 4. Значения среднеквадратичной ошибки в каждом временном блоке

На рис. 5 представлены итерационные изменения параметрических величин коэффициента теплопроводности в первом временном блоке, а на рис. 6 – сравнение с истинным значением коэффициента теплопроводности как функции от температуры.

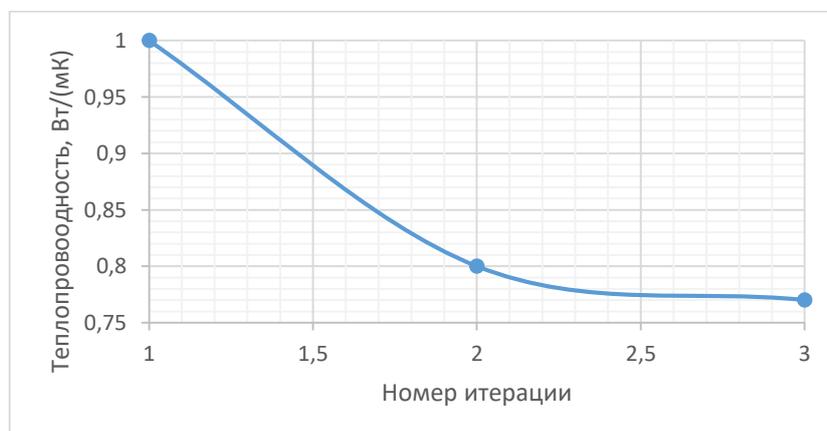


Рис. 5. Итерационные изменения коэффициента теплопроводности в первом временном блоке

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ ТЕПЛОМ НАГРЕВЕ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

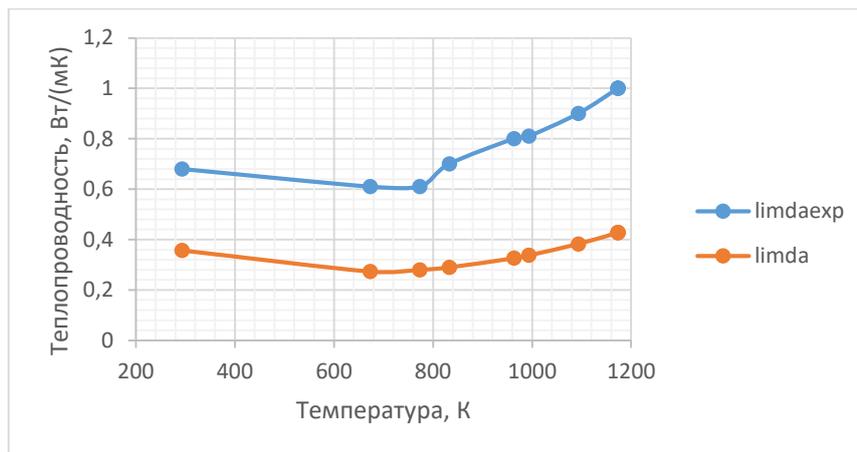


Рис. 6. Температурные зависимости коэффициента теплопроводности материала

Также особый интерес представляет анализ относительной погрешности полученного значения, вычисленный по формуле:

$$\delta = \frac{|\lambda_p(T) - \lambda_{exp}(T)|}{\lambda_{exp}(T)}$$

Результаты представлены на рис. 7.

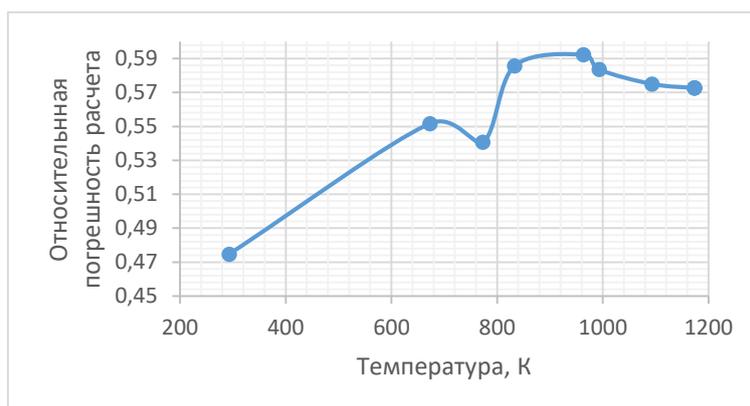


Рис. 7. Относительная погрешность восстановленного коэффициента теплопроводности по отношению к известному

## ВЫВОДЫ

1. Разработан алгоритм параметрической идентификации коэффициента теплопроводности как функции от времени для волнового уравнения теплопроводности при воздействии высокоэнтальпийного теплового потока с учетом термического разложения материала методом итерационной регуляризации на примере теплозащитного покрытия, выполненного из углепластичного материала.

2. Результаты показали, что расчетные значения коэффициента теплопроводности лежат в рассматриваемом температурном диапазоне 0,38–0,41.

3. Данный метод определения коэффициента теплопроводности может быть использован при исследовании высокоинтенсивного теплообмена для теплозащитных материалов, применяемых для теплозащиты ракет-носителей и спускаемых космических аппаратов (КА).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борщев Н.О. Параметрическая идентификация среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи в аксиальных тепловых трубах // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 93–103.
2. Басистов Ю.А., Яновский Ю.Г. Некорретные задачи в механике (реологии) вязкоупругих сред и их регуляризация // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16. № 1. С. 117–143.

3. Бакушинский А.Б., Кокурин М.Ю., Кокурин М.М. Прямые и обратные теоремы для итерационных методов решения нерегулярных операторных уравнений и разностных методов решения некорректных задач Коши // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60. № 6. С. 939–962.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Васин В.В. Модифицированный метод наискорейшего спуска для нелинейных регулярных операторных уравнений // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. № 3. С. 264.
6. Голычев И.И. Модифицированный градиентный метод наискорейшего спуска решения нелинейной задачи для нестационарных уравнений Навье–Стокса // Уфимский математический журнал. 2013. Т. 5. № 4. С. 60–76.
7. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979.
8. Przedkiewicz K., Mitkowski W. A memory-efficient noninteger-order discrete-time state–space model of a heat transfer process // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2018. V. 28. № 4. P. 649–659.
9. Investigation of heat transfer surfaces for space power systems / A.Y. Baranov, A.Y. Belov, D.N. Ilmov, N.N. Kazantseva, Y.N. Mamontov, A.S. Skorokhodov // Thermal Engineering. 2018. V. 65. № 7. P. 473–481.
10. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 288 с.
11. Алифанов О.М., Колесников В.А. Определение элементов тензора теплопроводности анизотропных материалов из решения обратной задачи // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 58. № 2. С. 1–13.
12. Борщев Н.О. Параметрическая идентификация падающего теплового потока на зеркальные элементы космических обсерваторий // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2022, Т.11, № 2, С. 101–108.
13. Тепловое проектирование и пофрагментная наземная обработка системы обеспечения теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения на базе сотопанелей с тепловыми трубами / Р.М. Копяткевич, В.М. Гуля, Д.В. Тулин, А.Ф. Шабарчин // Космонавтика и ракетостроение. 2010. Вып. 3(60). С. 33–41.
14. Shaenko A.Yu., Milyutin D.S. Heat transfer in the radiation shields of large space telescopes // Doklady Physics. 2010. V. 55. № 4. P. 172–175.
15. Kuznetsov G.V., Kozlobrodov A.N., Sandu S.F. Heat transfer in the instrument modules of space vehicles // Heat Transfer Research. 2003. V. 34. № 1–2. P. 135–141.
16. Semena N.P. The use of scale models in ground tests reproducing heat transfer in space // Thermophysics and Aeromechanics. 2014. V. 21. № 1. P. 45–55.
17. Testi D. Ion injection as an effective technique of heat transfer enhancement in space // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2007. V. 21. № 2. P. 431–436.
18. Baek Y., Jung E.G. Heat transfer performances of loop heat pipe for space vehicle thermal control under bypass line operation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. V. 194. P. 123064.
19. Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Дроздов И.Г. Моделирование процессов теплопереноса в микроканальных теплообменниках систем управления космической техники // Решетневские чтения. 2015. Т. 1. С. 203–205.
20. Fayazova Z.K. Boundary control of the heat transfer process in the space // Russian Mathematics. 2019. V. 63. № 12. P. 71–79.
21. Volodin Yu.G., Dul'nev G.N. An investigation of heat transfer coefficient by the «half-space period» // Journal of Engineering Physics. 1968. V. 9. № 5. P. 383–385.
22. Исследование теплообменных поверхностей для энергетических установок космического назначения / А.Е. Баранов, А.Е. Белов, Д.Н. Ильмов, Н.Н. Казанцева, Ю.Н. Мамонтов, А.С. Скороходов // Теплоэнергетика. 2018. № 7. С. 76–85.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY  
COEFFICIENT UNDER HIGH-INTENSITY HEAT HEATING,  
TAKING INTO ACCOUNT THERMAL DECOMPOSITION

N.O. Borshchev

Astrocsmic Center of the Federal State Institution of Science S.A. Lebedev Institute,  
Moscow, 119991, Russia

\*e-mail: moriarty93@mail.ru

Received January 27, 2023; revised February 11, 2023; accepted February 14, 2023

One of the primary tasks of thermal design is the compilation of an adequate thermal physical and mathematical model to ensure its regular thermal regime. In this paper, we consider a sequential method for determining the complex of thermophysical characteristics as functions of temperature during its ground-based thermal processing in natural conditions. The test object is subjected to high-intensity unidirectional thermal heating, which is typical during the descent and exit of spacecraft from the atmosphere of various planets. This problem is solved as a problem of finding a global minimum from minimizing the root-mean-square error between the theoretical and experimental temperature field. The algorithm of conjugate directions is chosen as the minimization method, as the most accurate method of the first order of convergence. When designing the thermal regime of structures, it is necessary to have an idea of the initial boundary conditions of the product, as well as its thermophysical characteristics. Thus, the determination of the thermal conductivity coefficient of the material is the target task in ensuring the normal thermal regime of the product.

*Keywords:* iterative regularization method, thermal conductivity coefficient of the material, conjugate directions method, root-mean-square error.

REFERENCES

1. Borshchev N.O. Parametricheskaya identifikatsiya sredneintegral'nogo koeffitsienta teplootdachi v aksial'nykh teplovykh trubakh [Parametric identification of the mean integral heat transfer coefficient in axial heat pipes]. Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. 2022. Vol. 29. No. 3. P. 93–103 (in Russian).

2. Bassistov Yu.A., Yanovsky Yu.G. Nekorrektnye zadachi v mekhanike (reologii) vyazkoprugikh sred i ih regulyarnizatsiya [Uncorrected problems in mechanics (rheology) of viscoelastic media and their regularization]. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii. 2010. Vol. 16. No. 1. P. 117–143 (in Russian).

3. Bakushinsky A.B., Kokurin M.Yu., Kokurin M.M. Pryamye i obratnye teoremy dlya iteratsionnykh metodov resheniya neregulyarnykh operatornykh uravneniy i raznostnykh metodov resheniya nekorrektnykh zadach Koshi [Direct and inverse theorems for iterative methods for solving irregular operator equations and difference methods for solving ill-posed Cauchy problems]. Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki. 2020. Vol. 60. No. 6. P. 939–962 (in Russian).

4. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Teploobmen izlucheniem [Heat exchange by radiation]. M.: Enegoatomizdat Publ, 1991.

5. Vasin V.V. Modifitsirovannyj metod naiskorejshego spuska dlya nelinejnykh regulyarnykh operatornykh uravneniy [Modified steepest descent method for nonlin-

ear regular operator equations]. Doklady Akademii nauk. 2015. Vol. 462. No. 3. P. 264 (in Russian).

6. Golichev I.I. Modifitsirovannyj gradientnyj metod naiskorejshego spuska resheniya neleniarnizovannoj zadachi dlya nestatsionarnykh uravneniy Nav'c-Stoksa [Modified gradient method of the steepest descent of the solution of the non-linearized problem for non-stationary Navier-Stokes equations]. Ufimskij matematicheskij zhurnal. 2013. Vol. 5. No. 4, P. 60–76 (in Russian).

7. Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. Raschet teploobmena kosmicheskogo apparata [Calculation of heat exchange of the spacecraft]. M.: Mashinostroenie Publ, 1979.

8. Oprzedkiewicz K., Mitkowski W. A memory-efficient noninteger-order discrete-time state–space model of a heat transfer process. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2018. Vol. 28. No. 4. P. 649–659.

9. Investigation of heat transfer surfaces for space power systems / A.Y. Baranov, A.Y. Belov, D.N. Ilmov, N.N. Kazantseva, Y.N. Mamontov, A.S. Skorokhodov. Thermal Engineering. 2018. Vol. 65. No. 7. P. 473–481.

10. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rumyantsev S.V. Ekstremal'nye metody resheniya nekorrektnykh zadach [Extreme methods of solving incorrect problems]. M.: Nauka. Gl. ed. phys.-mat. lit Publ, 1988. 288 p.

11. Alifanov O.M., Kolesnikov V.A. Opredelenie elementov tenzora teploprovodnosti anizotropnykh materialov iz resheniya obratnoj zadachi [Determination of the elements of the thermal conductivity tensor of aniso-

tropic materials from the solution of the inverse problem]. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta*. 2012. Vol. 58. No. 2. P. 1–13 (in Russian).

12. *Borshchev N.O.* Parametric identification of the incident heat flux on the mirror elements of space observatories. *Vestnik NIYaU MEFI*, 2022. Vol. 11. No. 2. P. 101–108 (in Russian).

13. Teplovoe proektirovanie i pofragmentnaya nazemnaya otrabotka sistemy obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskogo apparata negermetichnogo ispolneniya na baze sotopanelij s teplovymi trubami [Thermal design and post-fragment ground testing of the system for ensuring the thermal regime of a non-pressurized spacecraft based on honeycomb panels with heat pipes] / *R.M. Kopyatkevich, V.M. Gulya, D.V. Tulin, A.F. Shabarchin*. *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2010. iss. 3(60). P. 33–41 (in Russian).

14. *Shaenko A.Yu., Milyutin D.S.* Heat transfer in the radiation shields of large space telescopes. *Doklady Physics*. 2010. Vol. 55. No. 4. P. 172–175.

15. *Kuznetsov G.V., Kozlobrodov A.N., Sandu S.F.* Heat transfer in the instrument modules of space vehicles. *Heat Transfer Research*. 2003. Vol. 34. No. 1–2. P. 135–141.

16. *Semena N.P.* The use of scale models in ground tests reproducing heat transfer in space. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014. Vol. 21. No. 1. P. 45–55.

17. *Testi D.* Ion injection as an effective method of increasing heat transfer in space. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2007. Vol. 21. No. 2. P. 431–436.

18. *Baek Yu., Jung E.G.* Characteristics of heat transfer of a contour heat pipe for spacecraft thermal regulation during bypass line operation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 194. P. 123064.

19. *Konovalov D.A., Kozhukhov N.N., Drozdov I.G.* [Modeling of heat transfer processes in microchannel heat exchangers of space technology control systems]. *Reshetnevskie chteniya*. 2015. Vol. 1. P. 203–205 (in Russian).

20. *Fayazova Z.K.* Boundary control of the heat transfer process in the space. *Russian Mathematics*. 2019. Vol. 63. No. 12. P. 71–79.

21. *Volodin Yu.G., Dul'nev G.N.* An investigation of heat transfer coefficient by the «half-space period». *Journal of Engineering Physics*. 1968. Vol. 9. No. 5. P. 383–385.

22. Issledovanie teploobmennyh poverhnostej dlya energeticheskikh ustanovok kosmicheskogo naznacheniya [Investigation of heat exchange surfaces for space power plants] / *A.E. Baranov, A.E. Belov, D.N. Ilmov, N.N. Kazantseva, Yu.N. Mamontov, A.S. Skorokhodov*. *Teploenergetika*. 2018. No. 7. P. 76–85 (in Russian).

УДК 629.7.054.07

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ И ДЕМПФИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

© 2022 П.А. Илюшин<sup>1\*</sup>, В.П. Наумченко<sup>1</sup>, Д.Г. Пикунов<sup>1</sup>, А.В. Соловьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «ЦЭНКИ» – филиал «НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова», Москва, 129110, Россия

e-mail: P.Ilyushin@russian.space

Поступила в редакцию: 23.01.2023

После доработки: 13.02.2023

Принята к публикации: 14.02.2023

Целью проводимых работ является разработка системы амортизации и демпфирования бесплатформенного инерциального измерительного прибора космического назначения вибростойкого при всех уровнях полета, включая нештатные. В настоящей работе рассматривается дальнейшее развитие концепции линейной системы амортизации и демпфирования. Нелинейная математическая модель динамической системы была разработана в среде Simulink, задание параметров системы демпфирования и запуск симуляции проводился через скрипт в Matlab. Был проведен цикл запусков с итерационным заданием параметров системы демпфирования при использовании только одного типа диссипативных сил. В результате было установлено, что вариант только с одним типом гашения колебаний неэффективен. Были проведены запуски математической модели, учитывающей сразу все типы диссипативных сил. Ключевым результатом работы на данном этапе является математическое описание происходящих механических процессов и формирование группы решений, обеспечивающих заданные требования по вибростойкости и габаритам системы амортизации и демпфирования в приборе. В дальнейших работах планируется уточнить математическую модель в части кинематики разрабатываемого прибора и провести моделирование для формирования итоговой концепции системы амортизации и демпфирования.

*Ключевые слова:* конструкция, динамические характеристики, вибрация, инерциальный прибор, вибрационно-струнный акселерометр, Matlab, Simulink.

**DOI:** <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.15>

### ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в управлении космическими аппаратами (КА) сводятся к замене уникальных инерциальных измерительных приборов для каждого участка полета к использованию одного инерциального блока [1]. Вследствие этого возникла задача создания прибора космического назначения, стойкого к внешним механическим воздействиям во всех режимах полета аппарата, включая аварийные, в том числе с сохранением точности ориентации измерительных осей [2]. В рамках выполнения этой задачи была обнаружена необходимость создания системы амортизации и демпфирования (САД), обеспечивающей виброизоляцию высокочувствительного вибрационно-струнного акселерометра (ВСА) собственной разработки [3]. В настоящее время задача обеспечения виброзащиты инерциальных приборов с применением пружинных амортизаторов и дополнительных гасителей колебаний достаточно актуальна [4, 5]. Существуют группы технических

решений для частных случаев [6], однако разработка САД для каждого конкретного устройства, в особенности для КА, остается уникальной. С учетом предварительных исследований ранее было проведено математическое моделирование линейной САД, в результате которого подтвердилась принципиальная возможность обеспечения требований к вибростойкости [7].

В текущей работе рассматриваются другие типы демпфирования, которые могут оказаться эффективнее с точки зрения рассеивания энергии и проще в конструктивном исполнении [8].

Целью текущей работы является создание концепции САД в реальном приборе на основе разработки более подробной математической модели, включающей дополнительное вязкое трение (ВТ), нелинейные элементы: дополнительное сухое трение (СТ), ограничители перемещения в ВСА, ударные демпферы (УД) или виброгасящие демпферы (ВД). Принципиальная структура анализируемой конструкции, включающей несколько вариантов диссипативных сил (ДС), приведена на рис. 1.

МЕТОДЫ

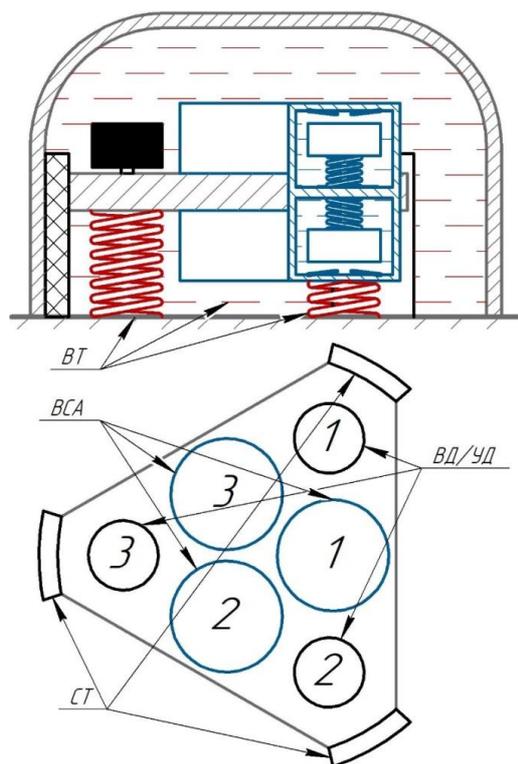


Рис. 1. Структурная схема прибора со всеми рассматриваемыми ДС

$$\begin{cases} M \cdot (\ddot{X} - g) + \beta \cdot (\dot{X} - \dot{X}_{\text{вх}}) + 3 \cdot C \cdot (X - X_{\text{вх}}) + 3 \cdot (C_{\text{ВСА}} + k_{\text{огр}} \cdot C_{\text{огр}}) \cdot (X - y) - F_{\text{д}} = 0; \\ M_{\text{ВСА}} \cdot (\ddot{y} - g) + (\beta_{\text{ВСА}} + k_{\text{огр}} \cdot \beta_{\text{огр}}) \cdot (\dot{y} - \dot{X}) + (C_{\text{ВСА}} + k_{\text{огр}} \cdot C_{\text{огр}}) \cdot (y - X) = 0; \\ \begin{cases} k_{\text{огр}} = 0, & |y - X| < 1,3 \cdot 10^{-3}; \\ k_{\text{огр}} = 1, & |y - X| \geq 1,3 \cdot 10^{-3}, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

где  $X_{\text{вх}}, \dot{X}_{\text{вх}}$  – перемещение и скорость корпуса прибора в инерциальном пространстве;  $X, \dot{X}, \ddot{X}$  – перемещение, скорость и ускорение центра масс основания БЧЭ в инерциальном пространстве;  $M, \beta, C$  – масса, вязкость и жесткость колебательной системы БЧЭ;  $y, \dot{y}, \ddot{y}$  – перемещение, скорость и ускорение центра масс подвижной части ВСА в инерциальном пространстве;  $M_{\text{ВСА}}, \beta_{\text{ВСА}}, C_{\text{ВСА}}$  – масса, вязкость и жесткость колебательной системы ВСА;  $k_{\text{огр}}$  – коэффициент, обозначающий работу ограничителя в ВСА;  $\beta_{\text{огр}}, C_{\text{огр}}$  – вязкость и жесткость ограничителя в ВСА;  $g$  – ускорение свободного падения;  $F_{\text{д}}$  – компенсирующее воздействие от ДС.

Найти решение системы уравнений нелинейных механических колебаний (1) алгебраическими методами не получается и возникает необходимость решать задачу численными методами [10]. Для поиска решения была уточнена линейная математическая модель, написанная в Python, и создана нелинейная модель в среде Simulink. В качестве воздействия в нелинейной модели задавалось перемещение в виде случай-

**Описание математической модели.** Чтобы определить концептуальный облик прибора и сформулировать требования к параметрам конструкции САД, математическое моделирование проводилось в формате решения строгих уравнений движения БЧЭ, без применения методов конечных элементов и соответствующих программных продуктов. Также параллельно проводились экспериментальные исследования с целью качественного подтверждения результатов теоретической проработки, полученных на значимых этапах моделирования.

Модель БЧЭ была приближена к приборной в части ее начальной массы и геометрии задания воздействия на ВСА. Упругие ограничители в ВСА срабатывают при достижении относительного перемещения подвижной части порогового значения в 1,3 мм. Все ВСА и пружины приняты идентичными, что позволяет на данном этапе исключить из рассмотрения угловые перемещения в БЧЭ и исследовать закон движения механической системы [9] с обобщенными координатами, описывающими только поступательное движение подвижных элементов прибора в направлении одной оси:

ного процесса с определенной спектральной характеристикой в области от 20 до 2000 Гц в течение 2 с.

Было проведено итерационное моделирование реакции динамической системы на указанное воздействие с каждым отдельным вариантом ДС при помощи скрипта в Matlab. Проводились варьирование массы, собственной частоты системы амортизации, добротности колебательного контура БЧЭ, величин характеристик элементов, задающих ДС. Можно выделить два пути рассеивания энергии: воздействие напрямую на БЧЭ (ВТ и СТ) и через инерциальную массу демпфера (УД, ВД).

Велась оценка относительных перемещений БЧЭ и в ВСА, а также фиксировалась спектральная плотность виброускорения в их характерных точках. Оптимальным решением считается вариант, при котором выполняются следующие требования к САД, в основном связанные с ограниченными габаритно-массовыми характеристиками прибора космического назначения [11]:

- относительное перемещение БЧЭ не более 6 мм;
- относительное перемещение ВСА не более 2 мм;
- суммарная масса минимальна;
- собственные частоты максимальны;
- дополнительные ДС минимальны.

**Рассматриваемые варианты диссипативных сил.** Введение ВТ для колебательной системы является полным аналогом уменьшения ее собственной добротности, введение СТ создает нелинейное гашение колебаний. Причем эти процессы проявляются во всех реальных механических колебательных системах. В машиностроении известно много конструктивных исполнений для дополнительного повышения трения [12]. Важно понимать, что при трении, превышающем силы, вызывающие относительное перемещение, возникает абсолютно жесткая связь вместо пружин БЧЭ с конечной упругостью, в результате САД полностью перестает работать.

При использовании УД и ВД гашение колебаний происходит благодаря инерционной массе демпфера. В общем случае демпфер является динамической системой с подвижным вдоль одной оси грузом, ударяющимся об упоры, жестко связанные с БЧЭ [13]. Инерционная масса до начала колебаний покоится, при возникновении перемещения БЧЭ в демпфере с запаздыванием начинаются колебания в противофазе к основным колебаниям системы.

Принципиально в УД (рис. 2) передача воздействия происходит импульсно при ударе груза об упор, а в ВД (рис. 3) через пружину на всех участках движения груза пропорционально относительному перемещению [14]. В виброударном демпфере (рис. 4) между грузом и корпусом есть упругий элемент, преобразующий жесткий удар в удар с ограниченным спектром, что эквивалентно вибрационному демпферу, действующему на ограниченном перемещении [15].

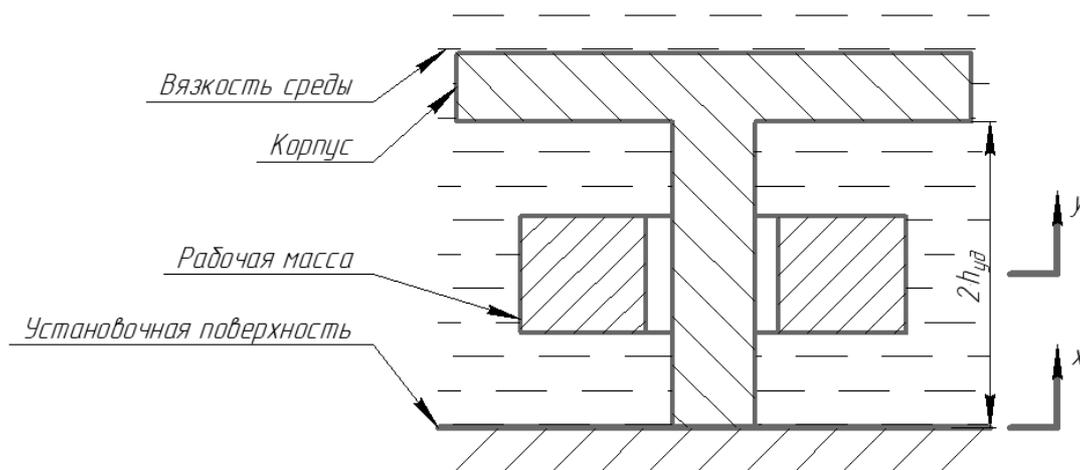


Рис. 2. Схема ударного демпфера

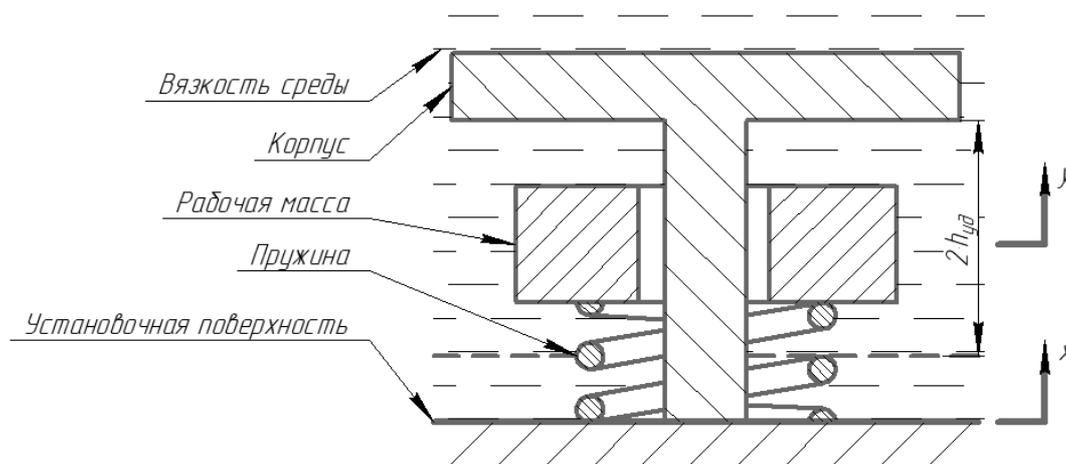


Рис. 3. Схема вибрационного демпфера

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ  
И ДЕМПФИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

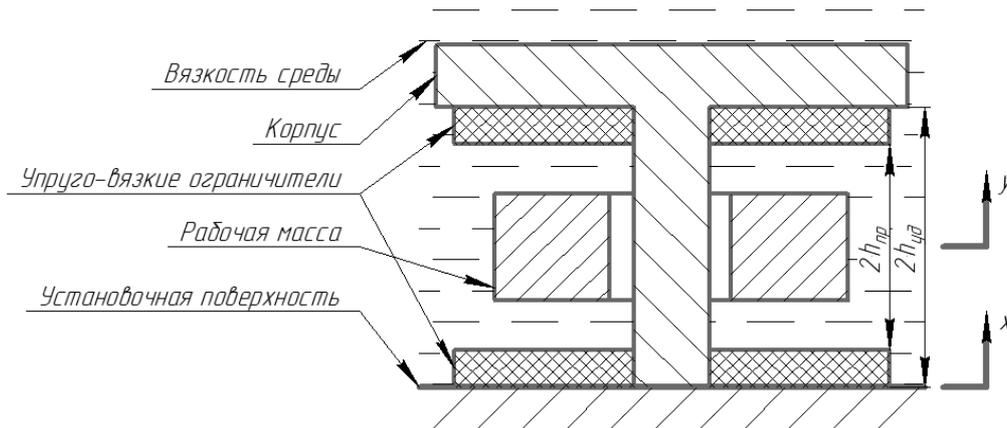


Рис. 4. Схема виброударного демпфера

Для рассмотренных демпферов можно выделить общую систему уравнений движения с допущением, что рабочая масса является материальной точкой, а упругие элементы линейно

сжимаются до своих предельных состояний. Если  $h_{пр} = 0$  – вибрационный демпфер, если  $h_{уд} \leq h_{пр}$  – ударный:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_d \cdot (\ddot{X} + \ddot{y} - g) + \beta \cdot (\dot{X} + \dot{y}) + \\ + (\beta_{пр} \cdot \Delta \dot{y}_{пр}^{верх} + C_{пр} \cdot \Delta y_{пр}^{верх}) + (\beta_{пр} \cdot \Delta \dot{y}_{пр}^{низ} + C_{пр} \cdot \Delta y_{пр}^{низ}) + \\ + (\beta_{уд} \cdot \Delta \dot{y}_{уд}^{верх} + C_{уд} \cdot \Delta y_{уд}^{верх}) + (\beta_{уд} \cdot \Delta \dot{y}_{уд}^{низ} + C_{уд} \cdot \Delta y_{уд}^{низ}) = 0; \\ \Delta y_{пр}^{верх} = \begin{cases} 0, & y < h_{пр}; \\ y - h_{пр} \cdot \text{sign}(y), & h_{пр} \leq y < h_{уд}; \\ (h_{пр} - h_{пр}) \cdot \text{sign}(y), & y > h_{пр}; \end{cases} \\ \Delta y_{пр}^{низ} = \begin{cases} 0, & y > -h_{пр}; \\ y - h_{пр} \cdot \text{sign}(y), & -h_{уд} \leq y < -h_{пр}; \\ (h_{м} - h_{пр}) \cdot \text{sign}(y), & y < -h_{уд}; \end{cases} \\ \Delta y_{уд}^{верх} = \begin{cases} 0, & y < h_{уд}; \\ y - h_{уд} \cdot \text{sign}(y), & y \geq h_{уд}; \end{cases} \\ \Delta y_{уд}^{низ} = \begin{cases} 0, & y > -h_{уд}; \\ y - h_{уд} \cdot \text{sign}(y), & y \leq -h_{уд}; \end{cases} \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $\dot{X}, \ddot{X}$  – скорость и ускорение центра масс основания БЧЭ в инерциальном пространстве;  $y, \dot{y}, \ddot{y}$  – перемещение, скорость и ускорение центра масс подвижной части демпфера в связанной с геометрическим центром демпфера системой координат;  $\Delta y_{пр}^{верх}, \Delta \dot{y}_{пр}^{верх}$  – относительное сжатие и скорость этого сжатия верхнего упругого элемента демпфера;  $\Delta y_{пр}^{низ}, \Delta \dot{y}_{пр}^{низ}$  – относительное сжатие и скорость этого сжатия нижнего упругого элемента демпфера;  $\Delta y_{уд}^{верх}, \Delta \dot{y}_{уд}^{верх}$  – относительное сжатие и скорость этого сжатия верхнего края демпфера;  $\Delta y_{уд}^{низ}, \Delta \dot{y}_{уд}^{низ}$  – относительное сжатие и скорость этого сжатия нижнего края демпфера;  $\text{sign}(y)$  – знак  $y$ .

**Математическое описание диссипативных сил.** Формулы, по которым определяются диссипативные силы в (1) приведены ниже:

для ВТ

$$F_d = -\beta_d \cdot (\dot{X} - \dot{X}_{вх}), \quad (3)$$

где  $\beta_d$  – дополнительная вязкость колебательной системы БЧЭ;

для СТ

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{сум} = 3 \cdot (C_{вса} + k_{орг} \cdot C_{орг}) \times \\ \times (X - y) + M \cdot \ddot{X}_{вх}; \\ F_d = F_{сум}, \quad |F_{сум}| < F_{тр}^{max}; \\ F_d = F_{тр}^{max}, \quad F_{сум} \geq F_{тр}^{max}; \\ F_d = -F_{тр}^{max}, \quad F_{сум} \leq -F_{тр}^{max}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $F_{сум}$  – сумма сил, которую компенсирует сухое трение;  $F_{тр}^{max}$  – максимальная величина сухого трения;

для ВД:

$$\begin{cases} M_d \cdot (\ddot{y}_d - g) + \beta_d \cdot (\dot{y}_d - \dot{X}) + \\ + C_d \cdot (y_d - X) = 0; \\ F_d = C_d \cdot (y_d - X), \end{cases} \quad (5)$$

где  $y_d, \dot{y}_d, \ddot{y}_d$  – перемещение, скорость и ускорение центра масс подвижной части демпфера в инерциальном пространстве;  $M_d, \beta_d, C_d$  – масса, вязкость и жесткость колебательной системы демпфера;

для УД:

$$\begin{cases} \frac{1}{6} \cdot M_d \cdot (\ddot{y}_{гр1} - g) + \beta_{гр} \cdot (\Delta \dot{y}_{гр1}^B + k\beta_H \cdot \Delta \dot{y}_{гр1}^H) + \\ + C_{гр} \cdot (\Delta y_{гр1}^B + kC_H \cdot \Delta y_{гр1}^H) = 0; \\ \Delta y_{гр1}^B = \begin{cases} 0, & y_{гр1} + h_{гр} < y_{гр2}; \\ y_{гр1} + h_{гр} - y_{гр2}, & y_{гр1} + h_{гр} \geq y_{гр2}; \end{cases} \\ \Delta y_{гр1}^H = \begin{cases} 0, & y_{гр1} < X; \\ y_{гр1} - X, & y_{гр1} \geq X; \end{cases} \\ \frac{1}{6} \cdot M_d \cdot (\ddot{y}_{гri} - g) + \beta_{гр} \cdot (\Delta \dot{y}_{гri}^B + \Delta \dot{y}_{гri}^H) + C_{гр} \cdot (\Delta y_{гri}^B + \Delta y_{гri}^H) = 0; \\ \Delta y_{гri}^B = \begin{cases} 0, & y_{гri} + h_{гр} < y_{гri+1}; \\ y_{гri} + h_{гр} - y_{гri+1}, & y_{гri} + h_{гр} \geq y_{гri+1}; \end{cases} \\ \Delta y_{гri}^H = \begin{cases} 0, & y_{гri} < y_{гri-1} + h_{гр}; \\ y_{гri} - y_{гri-1} - h_{гр}, & y_{гri} \geq y_{гri-1} + h_{гр}; \end{cases} \\ i = 2..5; \\ \frac{1}{6} \cdot M_d \cdot (\ddot{y}_{гр6} - g) + \beta_{гр} \cdot (k\beta_B \cdot \Delta \dot{y}_{гр6}^B + \Delta \dot{y}_{гр6}^H) + \\ + C_{гр} \cdot (kC_B \cdot \Delta y_{гр6}^B + \Delta y_{гр6}^H) = 0; \\ \Delta y_{гр6}^B = \begin{cases} 0, & y_{гр6} + h_{гр} < X + h_d; \\ y_{гр6} + h_{гр} - X - h_d, & y_{гр6} + h_{гр} \geq X + h_d; \end{cases} \\ \Delta y_{гр6}^H = \begin{cases} 0, & y_{гр6} < y_{гр5} + h_{гр}; \\ y_{гр6} - y_{гр5} - h_{гр}, & y_{гр6} \geq y_{гр5} + h_{гр}; \end{cases} \\ F_d = kC_B \cdot C_{гр} \cdot \Delta y_{гр6}^{верх} + kC_H \cdot C_{гр} \cdot \Delta y_{гр1}^{низ}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $i$  – порядковый номер груза от 1 до 6, причем первый груз расположен снизу;  $y_{гri}, \ddot{y}_{гri}$  – перемещение и ускорение центра масс подвижной части  $i$ -го груза в инерциальном пространстве;  $\Delta y_{гri}^B, \Delta \dot{y}_{гri}^B$  – относительное сжатие и скорость этого сжатия верхней деформируемой части  $i$ -го груза;  $\Delta y_{гri}^H, \Delta \dot{y}_{гri}^H$  – относительное сжатие и скорость этого сжатия нижней деформируемой части  $i$ -го груза;  $M_d$  – суммарная масса грузов в демпфере;  $\beta_{гр}, C_{гр}$  – вязкость и жесткость при соударении между деформируемыми частями грузов;  $k\beta_H, kC_H$  – коэффициенты приведения вязкости и жесткости при соударении между деформируемыми частями нижнего груза и БЧЭ;  $k\beta_B, kC_B$  – коэффициенты приведения вязкости и жесткости при соударении между деформируемыми частями верхнего груза и БЧЭ;  $h_{гр}$  – высота одного груза;  $h_d$  – рас-

стояние между краями ударного демпфера без грузов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Результаты независимого задания диссипативных сил.** На первом этапе работы проводилась комплексная оценка влияния на работу САД всех параметров, определяющих характеристики ДС, отдельно для каждого типа ДС. Поскольку моделирование варианта с УД наиболее ресурсоемкое, то рассмотрены далеко не все варианты. Был получен обширный комплекс решений [16]. Наилучшие результаты в наиболее приближенной к существующей конструкции, общее количество проведенных итераций и количество итераций при моделировании, в которых требования к САД обеспечены, приведены в табл. 1.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ  
И ДЕМПФИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Таблица 1. Результаты при  $M = 1,2$  кг,  $f = 30$  Гц,  $\beta = 7.54$  кг/с

Тип демпфирования	Относительное перемещение, мм		Число итераций	
	в БЧЭ	в ВСА	всего	успешных
Вязкое трение. $\beta_d=37.7$ кг/с	9.0	0.8	8000	498
Сухое трение. $F_{тр}^{max} = 160$ Н	13.1	1.1	88000	5764
Жидкостной демпфер. $M_d = 1.2$ кг. $\beta_d = 36.2$ кг/с	6.0	1.7	10000	156
Ударный демпфер. $M_d = 1.3$ кг	8.6	1.7	13641	0 (7244*)

\* Выполнены требования только по перемещению в ВСА, не выполнены требования по перемещению БЧЭ.

Как видно, обеспечить требования в части относительных перемещений ВСА возможно уже при системе амортизации с собственной частотой 30 Гц. Более сложной задачей оказалось гашение относительных перемещений, возникающих при колебаниях БЧЭ. Наиболее эффективным и технически обоснованным является одновременное применение нескольких вариантов введения диссипативных сил в САД.

**Комплексная система амортизации.** В рамках второго этапа было проведено моделирование при учете всех типов ДС, действующих одновременно. При моделировании не рассматривались только УД, поскольку в сравнении с ВД они показали результаты хуже. Модель САД (1) с учетом изложенного может быть описана системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} M \cdot (\ddot{X} - g) + (\beta + \beta_{доп}) \cdot (\dot{X} - \dot{X}_{вх}) + 3 \cdot C \cdot (X - X_{вх}) + \\ + 3 \cdot (C_{ВСА} + k_{огр} \cdot C_{огр}) \cdot (X - y) + 3 \cdot C_d \cdot (X - y_d) - F_{тр} = 0; \\ M_{ВСА} \cdot (\ddot{y} - g) + (\beta_{ВСА} + k_{огр} \cdot \beta_{огр}) \cdot (\dot{y} - \dot{X}) + (C_{ВСА} + k_{огр} \cdot C_{огр}) \cdot (y - X) = 0; \\ M_d \cdot (\ddot{y}_d - g) + \beta_d \cdot (\dot{y}_d - \dot{X}) + C_d \cdot (y_d - X) = 0; \\ \left[ \begin{array}{l} k_{огр} = 0, \quad |y - X| < 1,3 \cdot 10^{-3}; \\ k_{огр} = 1, \quad |y - X| \geq 1,3 \cdot 10^{-3}; \end{array} \right. \\ \left[ \begin{array}{l} F_{сум} = 3 \cdot (C_{ВСА} + k_{огр} \cdot C_{огр}) \cdot (X - y) + 3 \cdot C_d \cdot (X - y_d) + M \cdot \ddot{X}_{вх}; \\ F_{тр} = F_{сум}, \quad |F_{сум}| < F_{тр}^{max}; \\ F_{тр} = F_{тр}^{max}, \quad F_{сум} \geq F_{тр}^{max}; \\ F_{тр} = -F_{тр}^{max}, \quad F_{сум} \leq -F_{тр}^{max}, \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $X_{вх}$ ,  $\dot{X}_{вх}$ ,  $\ddot{X}_{вх}$  – перемещение, скорость и ускорение корпуса прибора в инерциальном пространстве;  $X$ ,  $\dot{X}$ ,  $\ddot{X}$  – перемещение, скорость и ускорение центра масс основания БЧЭ в инерциальном пространстве;  $M$ ,  $\beta$ ,  $C$  – масса, вязкость и жесткость колебательной системы БЧЭ;  $y$ ,  $\dot{y}$ ,  $\ddot{y}$  – перемещение, скорость и ускорение центра масс подвижной части ВСА в инерциальном пространстве;  $M_{ВСА}$ ,  $\beta_{ВСА}$ ,  $C_{ВСА}$  – масса, вязкость и жесткость колебательной системы ВСА;  $k_{огр}$  – коэффициент, обозначающий работу ограничителя в ВСА;  $C_{огр}$  – вязкость и жесткость ограничителя в ВСА;  $g$  – ускорение свободного падения;  $y_d$ ,  $\dot{y}_d$ ,  $\ddot{y}_d$  – перемещение, скорость и ускорение центра масс подвижной части жидкостного демпфера в

инерциальном пространстве;  $M_d$ ,  $\beta_d$ ,  $C_d$  – масса, вязкость и жесткость колебательной системы жидкостного демпфера;  $\beta_{доп}$  – дополнительная вязкость колебательной системы БЧЭ;  $F_{сум}$  – сумма сил, которую компенсирует сухое трение;  $F_{тр}$  – сила сухого трения;  $F_{тр}^{max}$  – максимальная величина сухого трения.

Для наиболее точного соответствия реальным условиям испытаний продолжительность воздействия при моделировании была увеличена до 20 с. В остальных условиях моделирования соответствовали первому этапу. Из множества полученных решений можно выделить следующие характерные варианты САД, описывающие группы решений (табл. 2).

Таблица 2. Характерные варианты САД

№ группы	Характеристики системы амортизации и демпфирования	Перемещение, мм		Описание
		в БЧЭ	в ВСА	
1	$M = 1.2$ кг. $C = 72056$ Н/м. $\beta_{\text{доп}} = 29$ кг/с. $m_d = 0.6$ кг. $f_d = 30$ Гц. $Q_d = 5$ . $F_{\text{тр}} = 180$ Н	5.9	1.9	Сохранение массы БЧЭ небольшое вязкое трение, небольшие искажения в области полосы пропускания ВСА
2	$M = 1.2$ . $C = 72056$ Н/м. $\beta_{\text{доп}} = 59$ кг/с. $m_d = 0.6$ кг. $f_d = 29$ Гц. $Q_d = 5$ . $F_{\text{тр}} = 80$ Н	6	2	Сохранение массы БЧЭ, минимальное сухое трение, небольшие искажения в области полосы пропускания ВСА
3	$M = 1$ кг. $C = 66363$ Н/м. $\beta_{\text{доп}} = 26$ кг/с. $m_d = 0.6$ кг. $f_d = 29$ Гц. $Q_d = 5$ . $F_{\text{тр}} = 250$ Н	5.7	2	Небольшое снижение массы БЧЭ, небольшое сухое и вязкое трение
4	$M = 0.8$ кг. $C = 58396$ Н/м. $\beta_{\text{доп}} = 22$ кг/с. $m_d = 0.6$ кг. $f_d = 31$ Гц. $Q_d = 5$ . $F_{\text{тр}} = 140$ Н	5.9	2	Наименьшая масса и дополнительное сухое трение
5	$M = 0.8$ кг. $C = 53091$ Н/м. $\beta_{\text{доп}} = 10$ кг/с. $m_d = 0.6$ кг. $f_d = 31$ Гц. $Q_d = 5$ . $F_{\text{тр}} = 300$ Н	5.9	2	Наименьшая масса и дополнительное вязкое трение
6	$M = 0.8$ кг. $C = 63955$ Н/м. $\beta_{\text{доп}} = 45$ кг/с. $m_d = 0.6$ кг. $f_d = 29$ Гц. $Q_d = 5$ . $F_{\text{тр}} = 200$ Н	4.8	2	Самая высокая частота, небольшие искажения в области полосы пропускания ВСА

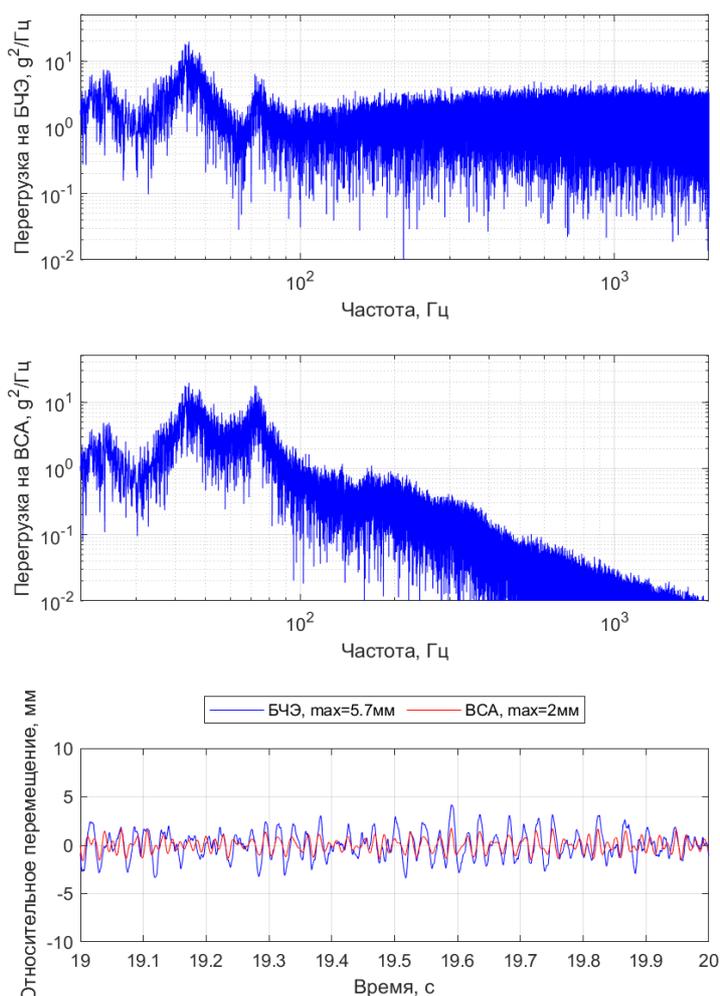


Рис. 5. Результат моделирования САД для группы 3

Полученные группы определяются исходя из несравнимости результатов, обусловленной невозможностью без отдельного анализа конструктивного исполнения определить, какое из решений объективно лучше в рамках многофакторного анализа [17]. В первую очередь, стоит рассматривать варианты со снижением массы БЧЭ. Графическое изображение результатов моделирования варианта наиболее близкого к существующей концепции САД приведено на рис. 5.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге получены группы решений с комплексом параметров элементов САД, обеспечивающих требуемую вибростойкость прибора с сохранением габаритных характеристик в пределах допуска. Для проверки технической реализуемости рассматриваемых результатов необходимо провести оценочный расчет конструкции требуемой системы демпфирования, разработать и исследовать математическую модель САД, соответствующую разрабатываемому прибору с кинематической точки зрения. Полученные на текущем этапе работ ключевые результаты могут быть использованы в качестве исходных при разработке конструкции и при моделировании САД разрабатываемого прибора.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ  
И ДЕМПФИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников И.Н., Неизвестных Ю.И., Душанин Н.Н. и др. Приоритет – точность. М.: Рестарт, 2006. 192 с.
2. Илюшин П.А., Наумченко В.П., Пикунов Д.Г. Анализ качества работы инерциальных приборов при воздействии внешних вибрационных возмущений // Сборник материалов 17-й Молодежной конференции «Новые материалы и технологии в ракетно-космической авиационной и других высокотехнологических отраслях промышленности». М.: ООО ТРП, 2021. 72 с.
3. Харьков И.А., Шустров А.Д., Селиванова Л.М. Трехкомпонентный дифференциальный вибрационно-струнный акселерометр // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2003. № 4. С. 120–125.
4. Подчерзцев В.П., Топильская С.В. К обоснованию выбора параметров амортизации инерциальной системы ориентации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2021. № 3 (136). С. 113–128.
5. Могилевич Л.И., Попов В.С., Попова А.А. и др. Математическое моделирование нелинейных колебаний стенки канала, взаимодействующей с вибрирующим штампом через слой вязкой жидкости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2022. № 2 (139). С. 26–41.
6. Суконкина М.Л., Гайнов С.И. Обзор методов и устройств виброзащиты приборных платформ // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород: ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р. Е. Алексеева», 2013. № 4 (101). С. 311–319.
7. Моделирование работы линейной системы амортизации и демпфирования бесплатформенного инерциального измерительного прибора / П.А. Илюшин, В.П. Наумченко, С.А. Максимов, Д.Г. Пикунов, А.В. Соловьев // Тезисы 21-й Международной конференции «Авиация и космонавтика». М.: Перо, 2022.
8. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний: пер. с англ. М.: Мир, 1988. 448 с.
9. Вульфсон И.И. Краткий курс теории механических колебаний М.: ВНТР, 2017. 241 с.
10. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2022. 276 с.
11. Управление космическими аппаратами зондирования Земли: Компьютерные технологии / Д.И. Коцлов, Г.П. Анишаков, Я.А. Мостовой, А.В. Соловуб. М.: Машиностроение, 1998. 366 с.
12. Кочетов О.С. Пружинный виброизолятор с сухим трением. Патент РФ. № 2618349 С1, 2016.
13. Иванов А.П. Динамика систем с механическими соударениями. М.: Международная программа образования, 1997. 336 с.
14. Пространственный виброгаситель. Патент СССР. SU 557219 А1. Заявка № 2305820, 1975.12.30; опубликовано: 1977.05.05.
15. Топильская С.В., Бородулин Д.С., Корнюхин А.В. Обеспечение стойкости к механическим воздействиям малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости // Космическая техника и технологии. 2018. № 3(22). С. 61–68.
16. Исследование обеспечения стойкости к внешним вибрационным возмущениям бесплатформенного инерциального измерительного прибора при помощи нелинейных элементов системы амортизации / П.А. Илюшин, В.П. Наумченко, Д.Г. Пикунов, А.В. Соловьев // Труды Четырнадцатой общерос. молодежн. науч.-техн. конф. «Молодежь. Техника. Космос». Т. 2. СПб.: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2022. 283 с.
17. Овсянников Г.Н. Факторный анализ в доступном изложении: Изучение многопараметрических систем и процессов. М.: ЛЕНАНД, 2022. 176 с.

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2022, vol. 11, no. 6, pp. 403–412

---

**MODELING OF THE NONLINEAR SYSTEM OF DAMPING  
AND DAMPING OF A STRAPLESS INERTIAL MEASURING DEVICE**

**P.A. Ilyushin<sup>1\*</sup>, V.P. Naumchenko<sup>1</sup>, D.G. Pikunov<sup>1</sup>, A.V. Soloviev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>АО «TsENKI» – branch of «Research Institute of PM named after Academician V.I. Kuznetsov», Moscow, 129110, Russia  
e-mail: P.Ilyushin@russian.space

Received January 23, 2023; revised February 13, 2023; accepted February 14, 2023

The purpose of the work being carried out is to develop a system of shock absorption and damping of a strapless inertial measuring device for space purposes that is vibration-resistant at all flight levels, including non-standard ones. In this paper, the further development of the concept of a linear system of depreciation and damping is considered. The nonlinear mathematical model of the dynamic system was developed in the Simulink environment, the parameters of the damping system were set and the simulation was run through a script in Matlab. A cy-

cle of launches was carried out with iterative setting of the parameters of the damping system using only one type of dissipative forces. As a result, it was found that the option with only one type of vibration damping is ineffective. A mathematical model was launched that takes into account all types of dissipative forces at once. The key result of the work at this stage is a mathematical description of the ongoing mechanical processes and the formation of a group of solutions that provide the specified requirements for vibration resistance and dimensions of the shock absorption and damping system in the device. In future works, it is planned to refine the mathematical model in terms of the kinematics of the device being developed and conduct modeling to form the final concept of the depreciation and damping system.

*Keywords:* design; dynamic characteristics; vibration; inertial device; vibration-string accelerometer; Matlab; Simulink.

## REFERENCES

1. Sapozhnikov I.N., Neizvestnyh Yu.I., Duhanin N.N. *i dr.* Prioritet – tochnost' [The priority is accuracy. M.: Restart Publ., 2006. 192 p.
2. Ilyushin P.A., Naumchenko V.P., Pikunov D.G. Analiz kachestva raboty inercial'nyh priborov pri vozdeystvii vneshnih vibracionnyh vozmushchenij [Analysis of the quality of work of inertial devices under the influence of external vibration disturbances]. Sbornik materialov 17-j Molodezhnoj konferencii «Novye materialy i tekhnologii v raketno-kosmicheskoy aviacionnoj i drugih vysokotekhnologichnyh otraslyah promyshlennosti» [Collection of materials of the 17th youth conference «New materials and technologies in rocket and space aviation and other high-tech industries»]. M., OOO TRP Publ., 2021. 72 p.
3. Har'kov I.A., Shustrov A.D., Selivanova L.M. Trekhkomponentnyj differencial'nyj vibracionno-strunnyj akselerometr [Three-component differential vibratory-string accelerometer]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Priborostroenie». 2003. No. 4. P. 120–125 (in Russian).
4. Podchezerev V.P., Topil'skaya S.V. K obosnovaniyu vybora parametrov amortizacii inercial'noj sistemy orientacii [To substantiate the choice of damping parameters of an inertial orientation system]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Priborostroenie», 2021. No. 3 (136). P. 113–128 (in Russian).
5. Mogilevich L.I., Popov V.S., Popova A.A. *i dr.* Matematicheskoe modelirovanie nelinejnyh kolebanij stenki kanala, vzaimodejstvuyushchej s vibriruyushchim shtampom cherez sloj vyazkoj zhidkosti [Mathematical modeling of nonlinear oscillations of the channel wall interacting with a vibrating stamp through a layer of viscous liquid]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Priborostroenie». 2022. No. 2 (139). P. 26–41 (in Russian).
6. Sukonkina M.L., Gajnov S.I. Obzor metodov i ustrojstv vibrozashchity pribornyh platform [Overview of methods and devices for vibration protection of instrument platforms]. Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva [Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseeva]. Nizhny Novgorod, FGBOU VO «NGTU im. R.E. Alekseeva» Publ. 2013. No. 4(101). P. 311–319 (in Russian).
7. Modelirovanie raboty linejnoy sistemy amortizacii i dempfirovaniya besplatformennogo inercial'nogo izmeritel'nogo pribora [Simulation of the operation of a linear system of shock absorption and damping of a strapdown inertial measuring device] / P.A. Ilyushin, V.P. Naumchenko, S.A. Maksimov, D.G. Pikunov, A.V. Solov'yov. Tezisy 21-j Mezhdunarodnoj konferencii «Aviatsiya i kosmonavtika» [Abstracts of the 21st International Conference «Aviation and Cosmonautics»]. M.: Pero Publ., 2022 (in Russian).
8. Nashif A., Dzhouns D., Henderson Dzh. Dempfirovanie kolebanij: per. s angl. [Vibration damping: per. from English]. M.: Mir Publ., 1988. 448 p.
9. Vul'fson I.I. Kratkij kurs teorii mekhanicheskikh kolebanij [A short course in the theory of mechanical vibrations. M.: VNTR Publ., 2017. 241 c.
10. Kim D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik i praktikum dlya vuzov [Theory of automatic control: textbook and workshop for universities]. M.: Yurajt Publ., 2022. 276 p.
11. Upravlenie kosmicheskimi apparatami zondirovaniya Zemli: Komp'yuternye tekhnologii / D.I. Koshchlov, G.P. Anshakov, Ya.A. Mostovoj, A.V. Sologub. [Earth sensing spacecraft control: Computer technologies]. M.: Mashinostroenie Publ., 1998. 366 p.
12. Kochetov O.S. Pruzhinnyj vibroizolyator s suhim treniem [Spring vibration isolator with dry friction]. Patent RF. No. 2618349 C1. 2016.
13. Ivanov A.P. Dinamika sistem s mekhanicheskimi soudareniyami [Dynamics of Systems with Mechanical Collisions]. M.: Mezhdunarodnaya programma obrazovaniya Publ., 1997. 336 p.
14. Prostranstvennyj vibrogasitel' [Spatial vibration damper]. Patent the USSR, no. 557219 A1. Application no. 2305820, 1975.12.30. Published: 1977.05.05.
15. Topil'skaya S.V., Borodulin D.S., Kornyuhin A.V. Obespechenie stojkosti k mekhanicheskim vozmushstviyam malogabaritnogo giroskopicheskogo izmeritelya vektora uglovoj skorosti [Ensuring resistance to mechanical impacts of a small-sized gyroscopic meter of the angular velocity vector]. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. 2018. No. 3(22). P. 61–68.
16. Issledovanie obespecheniya stojkosti k vneshnim vibracionnym vozmushcheniyam besplatformennogo inercial'nogo izmeritel'nogo pribora pri pomoshchi nelinejnyh elementov sistemy amortizacii [Study of ensuring resistance to external vibration disturbances of a strapdown inertial measuring device using nonlinear elements of the damping system] / P.A. Ilyushin, V.P. Naumchenko, D.G. Pikunov, A.V. Solov'ev. Trudy chetyrnadcatoj obshcheros. molodezhn. nauch.-tekhn.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ  
И ДЕМПФИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

konf. «Molodezh'. Tekhnika. Kosmos» T. 2 [Proceedings of the fourteenth obscheros. youth. sci.-tech. conf. «The youth. Technique. Space». Vol. 2]. Saint Petersburg, BGTU «VOENMEH» im. D.F. Ustinova Publ., 2022. 283 p.

17. *Ovsyannikov G.N.* Faktornyj analiz v dostupnom izlozhenii: Izuchenie mnogoparametricheskih sistem i processov [Factor analysis in an accessible presentation: The study of multi-parameter systems and processes]. M.: LENAND Publ., 2022. 176 p.

УДК 004.582

## РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПО СБОРКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ СТАНЦИИ ВВЭР-1000

© 2022 Д.Г. Коваленок<sup>1</sup>, А.О. Толоконский<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

\*e-mail: toloconne@yandex.ru

Поступила в редакцию: 09.01.2023

После доработки: 12.01.2023

Принята к публикации: 24.01.2023

С развитием компьютерных технологий появилась возможность для моделирования и разработки тренажерных систем для различных сложных и опасных объектов управления, которые достаточно широко используют компьютерную графику. Первоначально компьютерная графика использовалась в основном для проектов игровой индустрии развлечений, таких как кино и приложения для игр, причем параллельно появляются первые компьютерные модели объектов управления. Развитие технологий компьютерной графики позволяет создавать трехмерные модели для технических систем ядерной энергетики. Моделирование в трехмерном пространстве дает возможность создавать компьютерные принципиально новые тренажеры для подготовки обслуживающего персонала АЭС. Данная статья посвящена разработке программного обеспечения по визуализации установки компоновки ТВС. Приведены сведения об архитектуре тренажерной системы, ее состав и описание, а также визуальная часть. Разработаны мнемосхемы управления линией установок сборки твэлов. Разработанный тренажер предоставляет визуальную информацию на участке компоновки ТВС. Были визуализированы установки, такие как стол подачи комплектующих, рольганг для подачи ВТУК, установка разборки магазина с твэлами, установка позиционирования твэлов по координате, установка сборки пучка твэлов, автооператор, укрытие временного хранения. Полученная модель визуализации в данной статье в будущем может использоваться для создания обучающих и тренажерных систем на ядерных объектах.

*Ключевые слова:* обучающие тренажеры, трехмерное моделирование, графические объекты, тепло-выделяющая сборка, визуальное представление.

**DOI:** <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.13>

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие высшие учебные заведения перешли на использование технологий 3D-графики для проведения практических занятий. Так, например, кафедра технологии машиностроения при ВГТУ использует для проведения лабораторных занятий комнату виртуальной реальности. Студенту предоставляется возможность побывать на некотором участке производства, и при этом перед ним стоит задача поместить оборудование и инструменты согласно технике безопасности. Таким образом, каждый студент может спроектировать некоторую часть цеха, а при совместном усилии можно воссоздать целое предприятие. Данная лаборатория предоставляет возможность проводить занятия по многим учебным дисциплинам на одной виртуальной площадке.

В ядерной энергетике также создаются виртуальные энергоблоки АЭС, которые помогают решать задачи на этапе проектирования станций

с реактором типа ВВЭР и БН[1]. Программное обеспечение виртуальных энергоблоков, как правило, функционирует на суперЭВМ и включает в себя программное обеспечение математической модели энергоблока и интерфейс пульта управления. С помощью виртуального пульта управления предоставляется возможность моделировать все возможные ситуации, которые происходят на площадке АЭС, реализовывать планы экспериментов по проверке динамических процессов в основных технологических и электротехнических системах и системах автоматики [2]. Пользователь программного обеспечения виртуального тренажера может перемещаться по макету, изменять масштабирование, просмотреть площадку АЭС и прилегающую к ней территорию, войти внутрь сооружений и увидеть составляющие оборудования. На стадии проектирования АЭС возможно анимировать объекты, задавать им любое технологическое состояние. Технология виртуальной реальности используется в компьютерных

**РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА  
ПО СБОРКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ СТАНЦИИ ВВЭР-1000**

тренажерах ремонтных процессов в учебно-тренировочных центрах АЭС для подготовки персонала обслуживания сложного технологического оборудования [3].

Виртуальные пульта, как правило, создаются с помощью программ виртуального моделирования, при этом моделируется воздействие оператора на элементы управления, движение этих элементов в результате воздействия, создание и расчет функциональной схемы пульта управления.

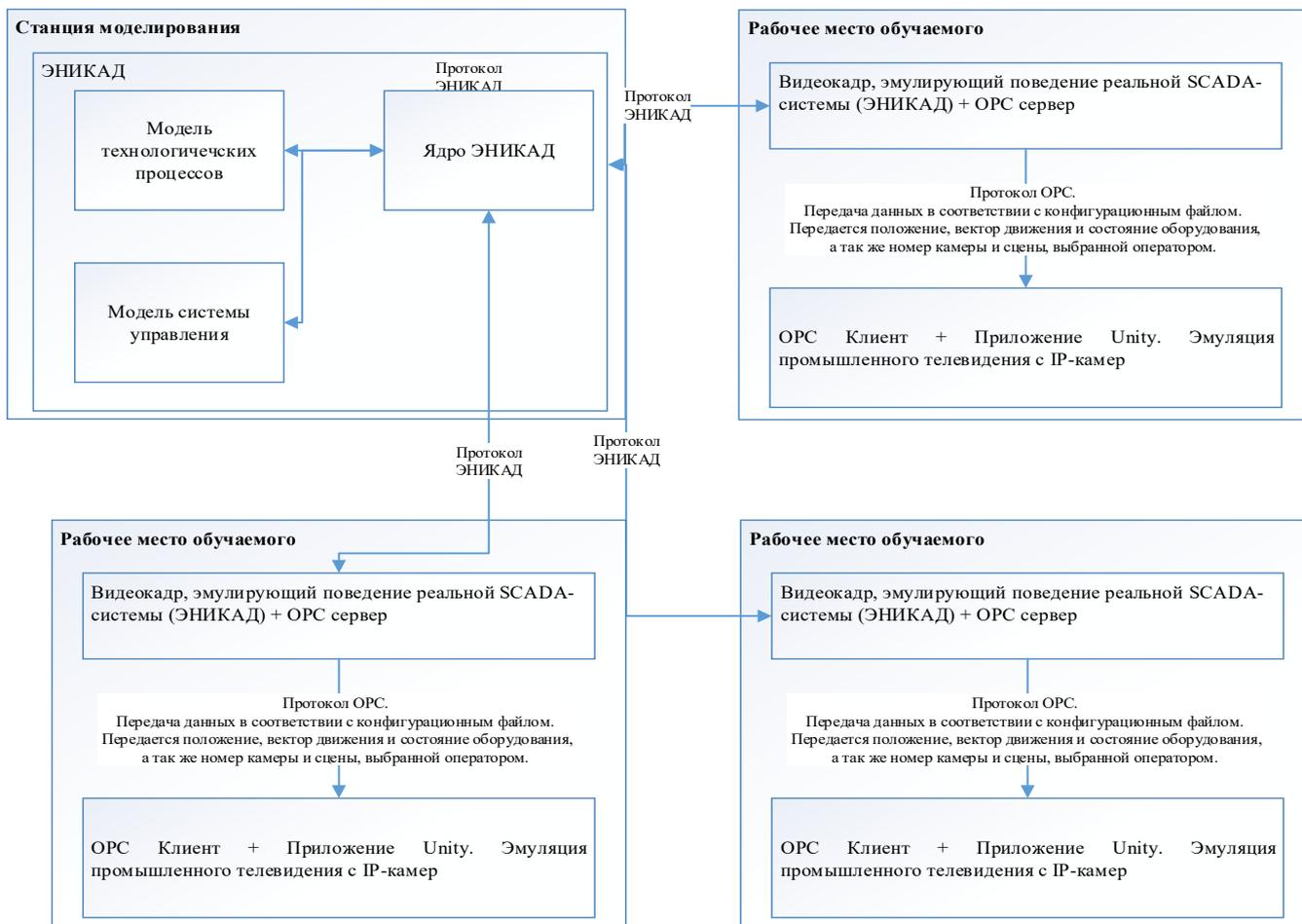
Область применения трехмерных моделей и виртуальной реальности в ядерной энергетике за последние десять лет активно развивается. Использование возможностей трехмерного моделирования для проверки проектных решений новых и существующих БПУ (блочный пункт управления) АЭС является актуальной задачей.

**СОСТАВ И ОПИСАНИЕ ТРЕНАЖЕРА  
ПО КОМПОНОВКЕ ТВС**

В данной статье будет описан разрабатываемый авторами тренажер для обучения персонала по сборке тепловыделяющих элементов для атомной станции ВВЭР-1000. Этот тренажер предназначен для осуществления визуального наблюдения за общей обстановкой, действиями персонала и технологическим процессом сборки и выходного контроля тепловыделяющих сборок в помещениях линии компоновки ТВС. В состав тренажера входят (рис. 1):

*1. Управляющий сервер (WebGL):*

- 1.1. Рассчитывает модель для управления объектом;
- 1.2. Рассчитывает математическую модель объекта управления;
- 1.3. Передает данные о состоянии оборудования на клиентские машины;
- 1.4. Передает сигнализацию на клиентские машины;
- 1.5. Обрабатывает команды управления от клиентских машин;
- 1.6. Ведет архив данных моделирования.



**Рис. 1. Архитектура программного тренажера**

GIW/ENICAD передает данные в UNITY по протоколу OPC. Для этого используется приложение Server.py, разработанное в рамках данного проекта. Обновление данных происходит асинхронно после завершения каждого шага модели.

2. Сервер визуализации (Unity):

- 2.1. Формирует 3D-модель на основе команд, полученных от управляющего сервера;
- 2.2. Обрабатывает команды по выбору камеры от операторских машин;
- 2.3. Передает запросившей машине данные для формирования видео с выбранной камеры;

2.4. Позволяет с некоторых видеокладов выбрать видеокламеры для визуального контроля состояния оборудования. Видео отображается в приложении Unity с использованием игрового движка Unity;

2.5. Приложение Unity запускается при загрузке тренажера и работает в фоне. При выборе оператором камеры в формате «приложение», «всплывает» поверх всех окон и отображает выбранную сцену;

2.6. Любой оператор может выбрать отображение любой камеры, а также все операторы могут выбрать одну камеру. Номер выбранной камеры передается переменной «Video» (рис. 2).

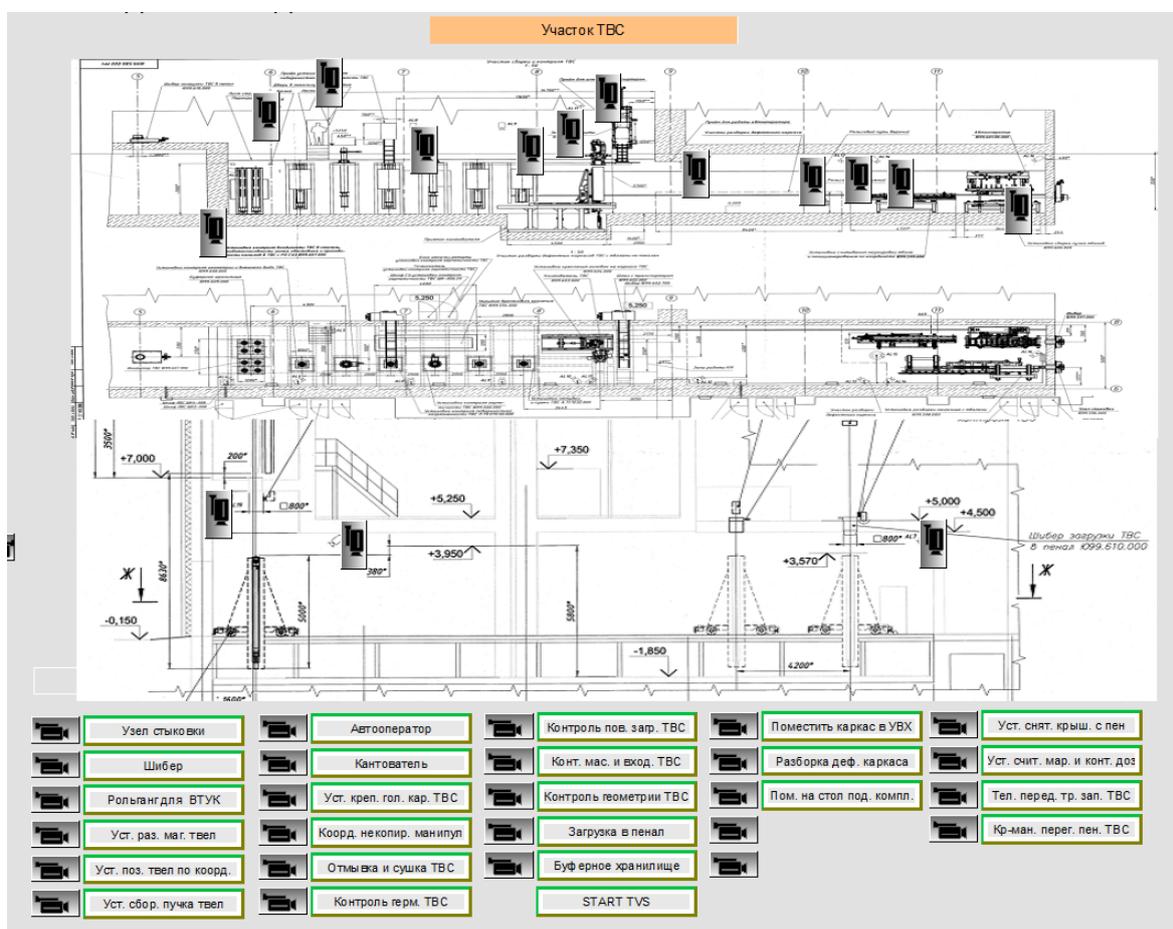


Рис. 2. Видеоклад выбора номера камеры

ВИЗУАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ  
УЧАСТКА СБОРКИ И КОНТРОЛЯ ТВС

Стол подачи комплектующих с форкамерой. Участок предназначен для проведения входного контроля и подачи твэлов и комплектующих. Технологический стол предназначен для прове-

дения операций по подготовке каркаса ТВС к подаче на участок сборки и контроля ТВС, закрепления каркаса ТВС, в сборке, компоновке головки с хвостовиком, для отсоединения головки ТВС и головки привода замка, перемещения привода замка в исходное положение [5].

## РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПО СБОРКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ СТАНЦИИ ВВЭР-1000

Для транспортирования каркаса ТВС по технологическим участкам используется специальное устройство, которое называется «ложемент-свидетель». Оно также предназначено для установки и закрепления каркаса ТВС с хвостовиком на столе подачи комплектующих.

Для того чтобы провести визуальный контроль выполняемой технологической операции, необходимо открыть изображение камеры участка подачи комплектующих, а также от-

крыть соответствующий видеокادر данного участка. На рис. 3 показано, какие параметры установки оператор может контролировать: номера каркаса ТВС, положение шибера форкамеры, наличие ложемент-свидетеля с каркасом ТВС или без него, готовность каркаса ТВС к перемещению в локализирующее укрытие, результат дозиметрического контроля ложемент-свидетеля, извлекаемого из локализирующего укрытия [6].

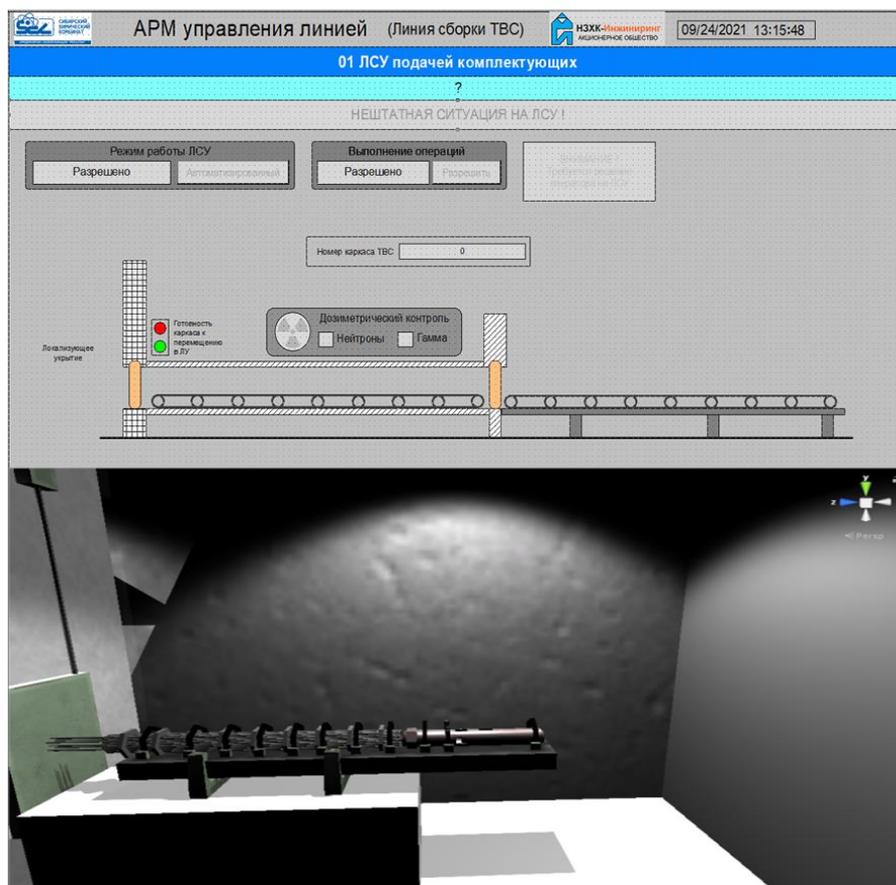


Рис. 3. Стол подачи комплектующих с форкамерой

*Рольганг для подачи ВТУК.* Эта установка предназначена для перемещения и сопряжения ВТУК с узлом стыковки. Состоит из рольганга, механизма центрирования ВТУК, устройства прижима. Привод рольганга электрический. Центрирующее устройство механическое эксцентриковое. Устройство прижима механическое с винтовым приводом.

Для визуального отображения установки необходимо открыть соответствующую камеру, отображающую ее внешний вид, а также окно видеокadra управления оборудованием установки [6].

На рис. 4 показано, какие параметры установки оператор может контролировать: номер

ВТУК, положение шибера, наличие ВТУК, готовность к извлечению магазина из ВТУК в локализирующее укрытие.

*Установка разборки магазина с твэлами.* Установка разборки магазина с твэлами предназначена для выполнения таких технологических операций, как: извлечение магазина с твэлами из ВТУК; извлечение твэлов из магазина; передача твэлов на установку считывания маркировки твэла и позиционирования по координате; загрузка пустого магазина во ВТУК; загрузка твэлов, извлеченных из дефектного каркаса ТВС с твэлами, в магазин; загрузка магазина с твэлами, извлеченными из дефектного каркаса ТВС с твэлами, во ВТУК.

В состав установки входят: механизм извлечения магазина с твэлами из ВТУК, устройство выгрузки твэлов из магазина с твэлами, устрой-

ство загрузки твэлов в магазин, механизм транспортный.

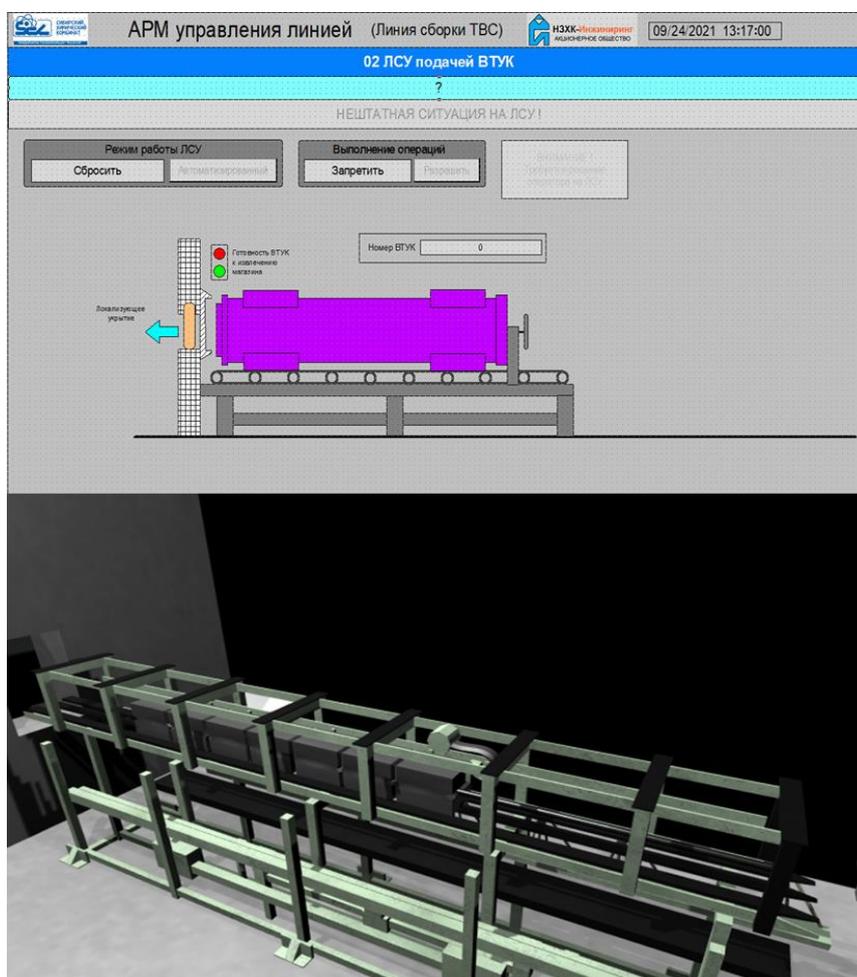


Рис. 4. Рольганг для подачи ВТУК

Механизм извлечения магазина с твэлами из ВТУК предназначен для захвата магазина с твэлами и извлечения его из ВТУК, загрузки во ВТУК порожнего или частично заполненного магазина, а также загрузки во ВТУК магазина с твэлами, извлеченными из дефектного каркаса ТВС с твэлами.

Устройство выгрузки твэлов из магазина с твэлами предназначено для поштучного извлечения твэлов из магазина с твэлами.

Устройство загрузки твэлов в магазин предназначено для поштучной загрузки твэлов, извлеченных из дефектного каркаса ТВС с твэлами. Механизм транспортный предназначен для передачи твэлов, извлеченных из магазина с твэлами, на установку считывания маркировки твэла и позиционирования по координате.

При переключении соответствующей камеры (рис. 5) оператор имеет возможность увидеть внешний вид установки, а при отображении

специального видеокadra – проконтролировать процесс разборки. Контролирующие параметры установки: наличие магазина, номер магазина, наличие твэла и его положение, номер твэла, количество снаряженных или извлеченных твэлов, результат дозиметрического контроля магазина.

Установка позиционирования твэла по координате. Установка считывания маркировки твэла и позиционирования по координате предназначена для выполнения следующих технологических операций: прием твэла с установки разборки магазина с твэлами, считывание маркировки твэла, позиционирование твэла по координате в соответствии с картограммой сборки компоновки ТВС, заталкивание твэла в каркас ТВС с одновременным нанесением смазки на твэл и измерением усилия заталкивания, извлечение твэла из каркаса ТВС при превышении допустимого значения усилия заталкивания.

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА  
ПО СБОРКЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ СТАНЦИИ ВВЭР-1000

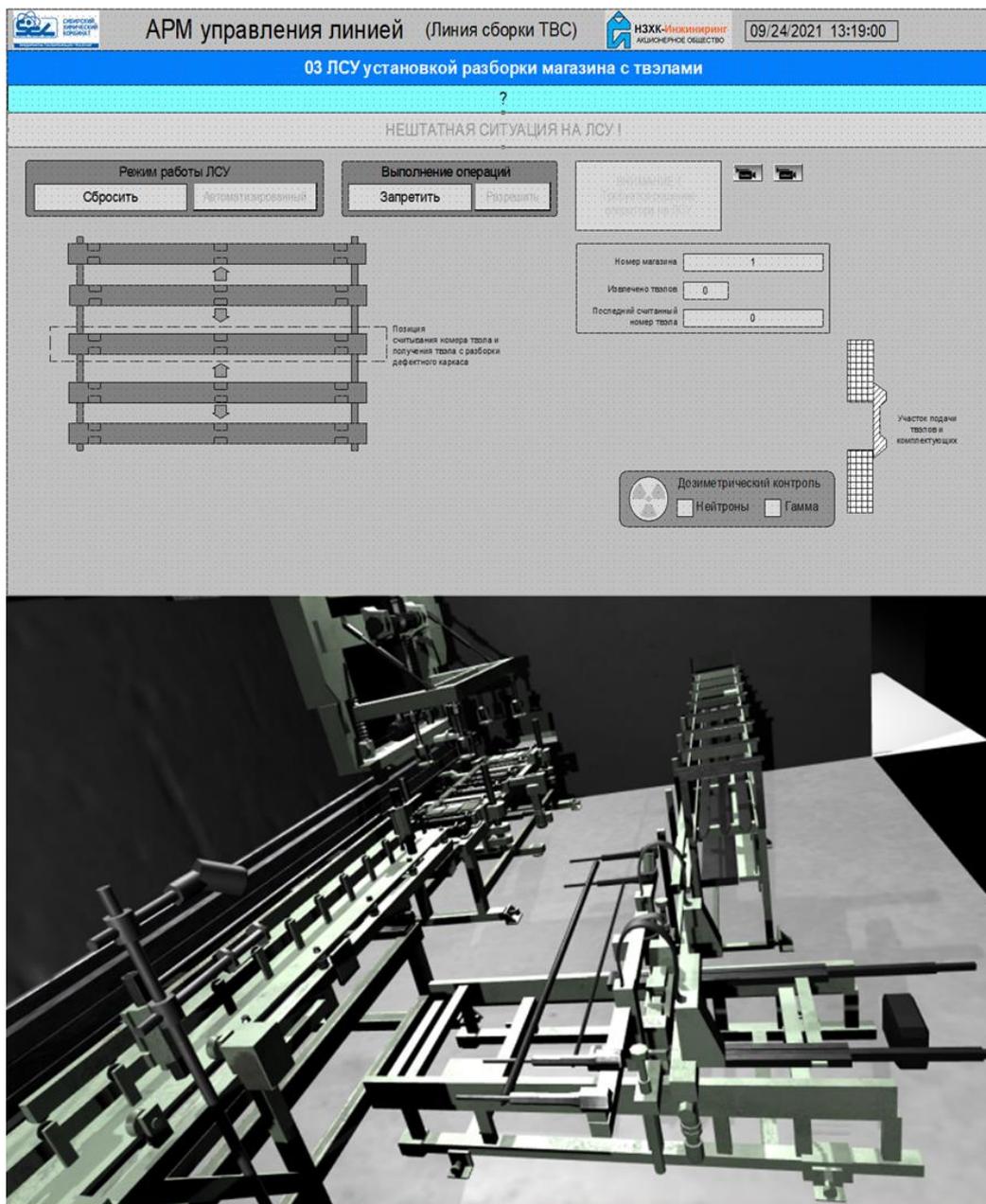


Рис. 5. Установка разборки магазина с ТВЭлами

Состав установки: станина; механизм горизонтального перемещения ТВЭла; механизм заталкивания ТВЭла; узел смазки; устройство извлечения бракованного ТВЭла; устройство контроля усилия заталкивания ТВЭла при прохождении ТВЭла через ячейки дистанционирующих решеток каркаса ТВС; устройство считывания маркировки ТВЭла (располагается на транспортной установке разборки магазина с ТВЭлами).

В состав установки также входит образец-свидетель (имитатор) ТВЭла для проведения настройки и проверки работоспособности оборудования.

Станина представляет собой жесткую сварную раму, на которой установлен механизм горизонтального перемещения.

Механизм горизонтального перемещения предназначен для позиционирования ТВЭла по горизонтали и состоит из линейных направляющих и привода горизонтального перемещения.

Механизм заталкивания состоит из жесткой сварной рамы, на которой установлен линейный привод для заталкивания ТВЭла в каркас ТВС. В процессе заталкивания ТВЭла контролируется усилие заталкивания (рис. 6).

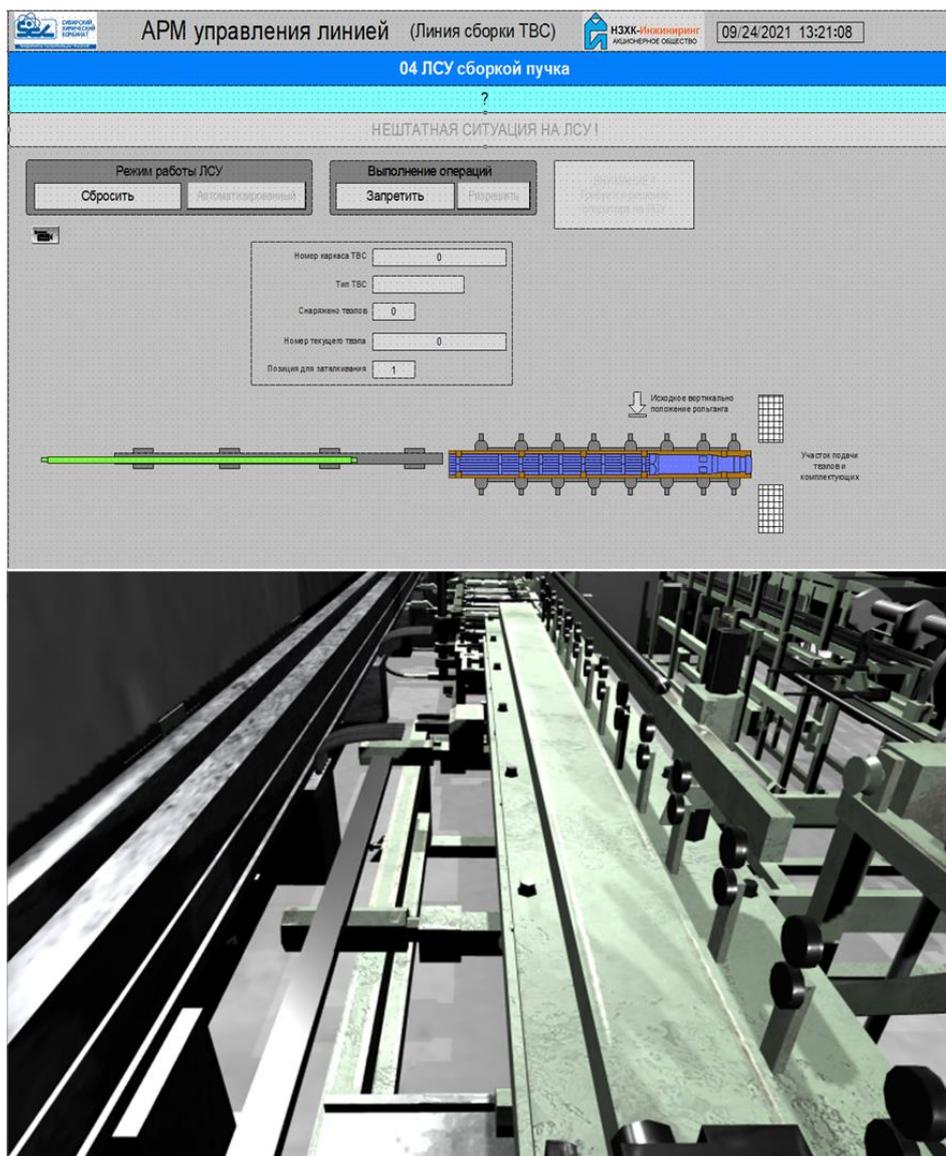


Рис. 6. Установка позиционирования твэла по координате

В случае превышения порогового значения усилия заталкивания процесс заталкивания твэла в каркас ТВС останавливается. Узел смазки предназначен для смазки твэла перед заталкиванием в каркас ТВС и состоит из корпуса, в котором расположены масляные форсунки.

Устройство извлечения бракованного твэла предназначено для извлечения бракованного твэла из каркаса ТВС. Устройство контроля усилия предназначено для контроля усилия заталкивания твэла при прохождении дистанционирующих решеток ТВС.

Средства контроля обеспечивают непрерывный автоматизированный контроль технологических параметров, а также безаварийную работу установки посредством осуществления автоматического управления и технологических блокировок.

*Установка сборки пучка твэлов.* Данная установка предназначена для приема каркаса ТВС и позиционирования каркаса ТВС по вертикали в соответствии с картограммой сборки компоновки ТВС. Состав установки: станина, механизм вертикального перемещения, стол. Станина представляет собой жесткую сварную раму, на которой установлен механизм вертикального перемещения.

Механизм вертикального перемещения состоит из домкратов и направляющих, с помощью которых осуществляется позиционирование каркаса ТВС по вертикали. Стол представляет собой жесткую сварную конструкцию, на которой устанавливается ложемент-свидетель с зафиксированным каркасом ТВС. Станина и стол по влиянию на безопасность относятся к элементам, важным для безопасности.

## РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПО СБОРКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ СТАНЦИИ ВВЭР-1000

При загрузке соответствующего номера камеры оператору представляется вид установки сборки пучка, а также при открытии специального видеокadra появляется возможность управлять процессом сборки. На рис. 7 показан внешний вид установки, а также на видеокад-

ре – контролируемые параметры установки, такие как: наличие ложемент-свидетеля с каркасом ТВС или без него, номер каркаса ТВС, тип ТВС, наличие твэла и его положение, номер твэла, количество снаряженных твэлов, позиция для заталкивания твэла [7].

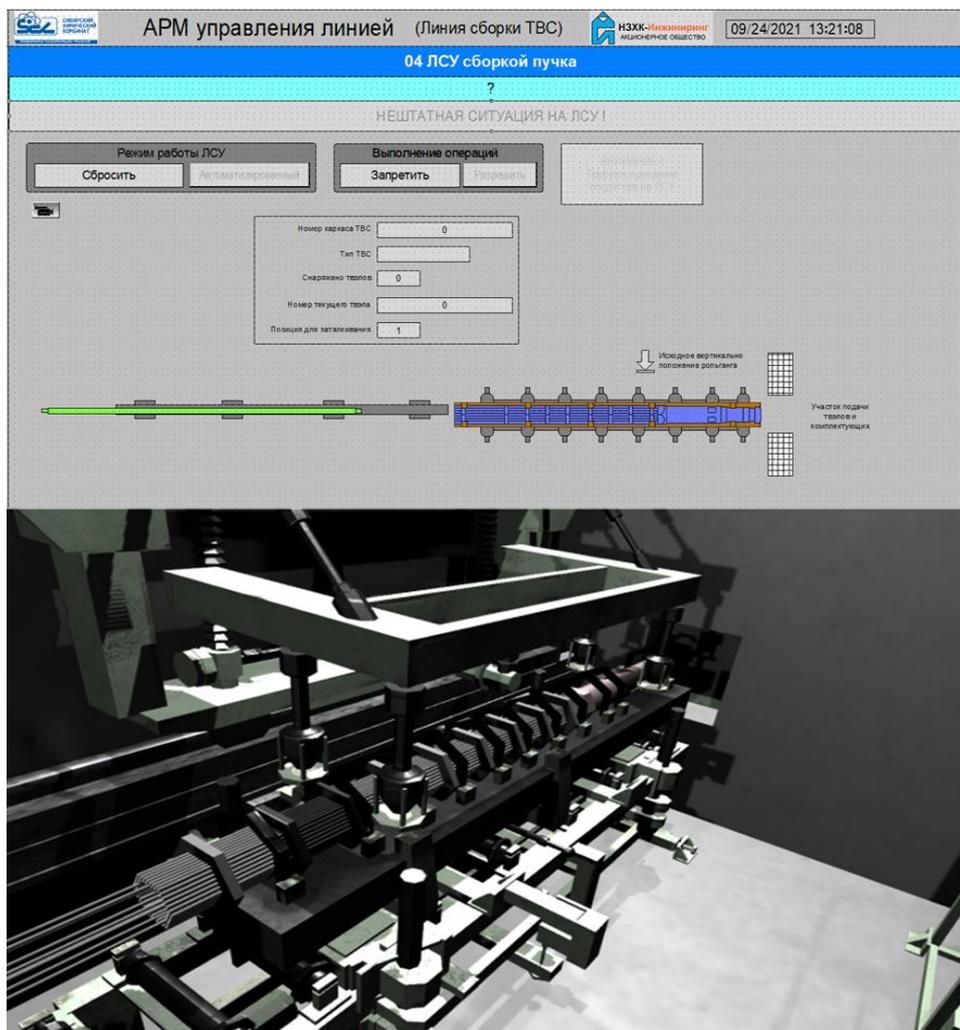


Рис. 7. Установка сборки пучка твэлов

*Автооператор.* Автооператор предназначен для выполнения таких операций, как: перемещение каркаса ТВС с пучком твэлов на ложементе-свидетеле в горизонтальном положении с установки сборки пучка на кантователь, перемещение дефектного каркаса ТВС с твэлами на ложементе-свидетеле на участок разборки дефектных каркасов ТВС с твэлами, перемещение дефектного каркаса ТВС и отрезанного хвостовика ТВС на ложементе-свидетеле с участка разборки на выходной рольганг шибер (для последующего удаления через шибер на участок подачи твэлов и комплектующих ТВС).

Состав автооператора: тележка ходовая, тележка грузовая, траверса.

Тележка ходовая является основной металлоконструкцией автооператора, на которой размещены все электромеханические приводы и тележка грузовая. Тележка ходовая осуществляет продольное перемещение автооператора и позиционирование его в трех рабочих положениях. Перемещение осуществляется по рельсовому пути. Тележка имеет дублирующий электрический привод, позволяющий закончить продольное перемещение автооператора в случае выхода из строя основного электродвигателя.

Тележка грузовая предназначена для поперечного перемещения траверсы и состоит из рамы и механизма подъема траверсы. Рама предназначена для крепления элементов механизма подъема траверсы. На раме смонтированы приводные колеса для перемещения тележки грузовой по направляющим тележки ходовой. Механизм подъема предназначен для вертикального перемещения траверсы и состоит из домкрата, тормоза, двух электродвигателей (основного и дублирующего) и системы наклонных тяг.

Траверса состоит из рамы несущей и механизма захвата. Она предназначена для фиксации и удержания ложемент-свидетеля в процессе его транспортировки с одной технологической позиции на другую. При этом ложемент-свидетель может быть пустым, в нем может быть закреплен каркас ТВС в сборе с хвостовиком либо каркас ТВС в сборе с хвостовиком, снаряженный твэлами. Грузозахватный орган траверсы надежно фиксирует груз, исключая возможность самопроизвольного высвобождения груза.

При включении камеры автооператора предоставляется возможность увидеть его внешнее

оборудование, а также при загрузке видеокadra возможно контролировать управляющие параметры, такие как: положение автооператора, наличие ложемент-свидетеля с каркасом ТВС или без него, номер каркаса ТВС, наличие ложемент-свидетеля с каркасом ТВС в укрытии временного хранения, номер каркаса ТВС, находящегося в укрытии временного хранения, вертикальное положение автооператора и состояние его захватов, позиция назначения при перемещении автооператора (рис. 8).

*Укрытие временного хранения.* Укрытие временного хранения предназначено для хранения ТВС с твэлами или собранной ТВС на ложементе-свидетеле. Укрытие технологически взаимодействует с автооператором и ложемент-свидетелем. В корпусе укрытия размещается подъемный стол, который способен принять изделие для последующего хранения в укрытии. На ложементах стола расположены упоры, предназначенные для точного позиционирования изделия на столе [8].

Крышка укрытия открывается двумя домкратами. Подъем крышки продолжается до момента срабатывания индукционного датчика (рис. 9).

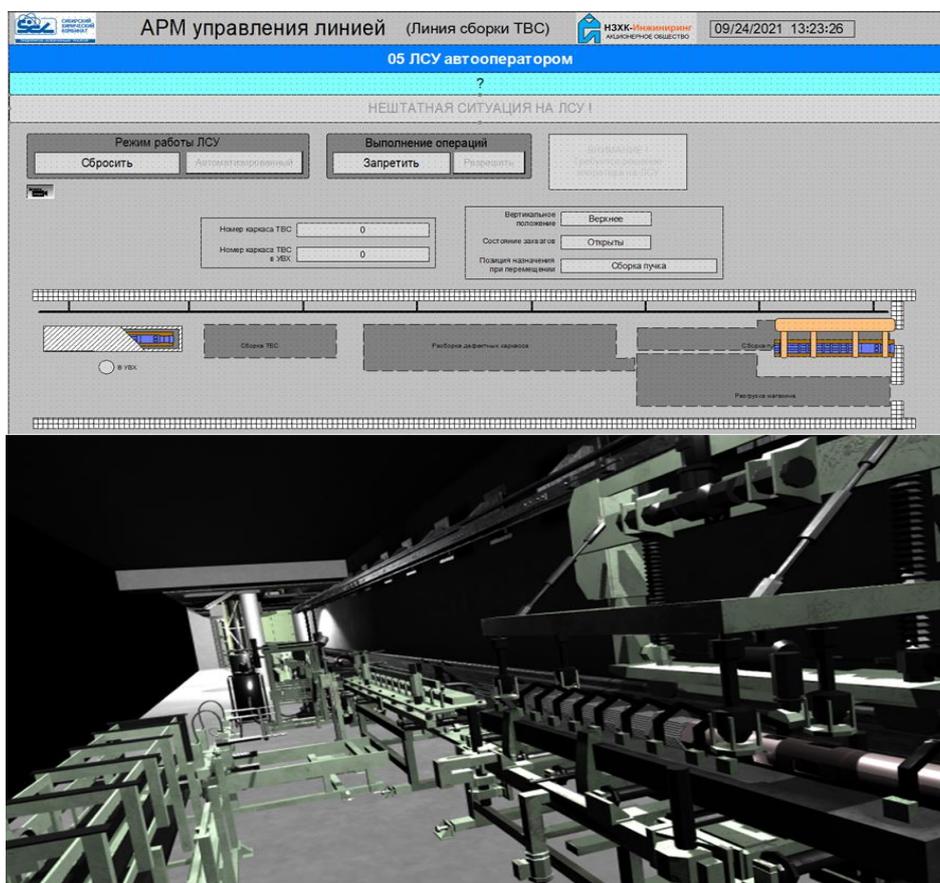


Рис. 8. Автооператор

## РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПО СБОРКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ СТАНЦИИ ВВЭР-1000

В крайнем верхнем положении стола укрытие способно принять изделие от автооператора для дальнейшего хранения. Изделие располагается на ложементках стола. О наличии и правильном расположении изделия на столе сигнализируют датчики, расположенные на крайних ложементках стола. После срабатывания датчи-

ков выполняется операция по разжатию захватов автооператора, и изделие, расположенное на столе, опускается в укрытие. В крайнем нижнем положении стола изделие полностью помещается в укрытие. Автооператор из зоны расположения укрытия перемещается на свободную позицию [10].

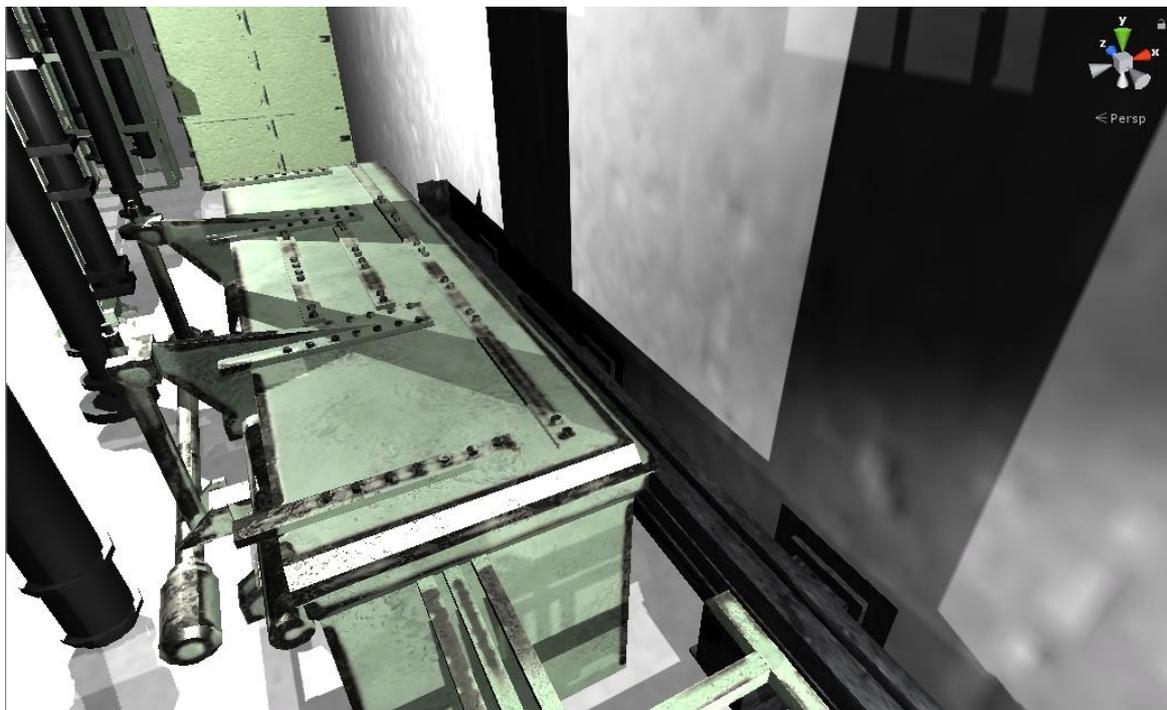


Рис. 9. Укрытие временного хранения

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт применения трехмерных моделей в ядерной энергетике показывает актуальность использования данной технологии. Продукты трехмерного моделирования позволяют создавать модель технологического оборудования ядерных энергетических устройств для учета антропометрических характеристик, разработки и расположения новых средств отображения информации и органов управления, проектирования освещенности рабочих мест и зон.

Использование инструментов виртуальной реальности, таких как Unity 3D, позволяет создавать среды для обучения и моделирования обнаружения радиоактивных источников, обеспечивать вычислительные модели, построение моделей с максимальной приближенностью к реальности.

Программный инструментарий в этом исследовании позволил моделировать участок сборки тепловыделяющих элементов. В данной работе были визуализированы определенные установ-

ки сборки компоновки ТВС, такие как: стол подачи комплектующих, рольганг для подачи ВТУК, установка разборки магазина с твэлами, установка позиционирования твэлов по координате, установка сборки пучка твэлов, автооператор, укрытие временного хранения.

Результаты визуализации установки тепловыделяющих элементов позволяют:

- наглядно увидеть расположение основных компонентов сборки;
- наблюдать за процессом и последовательностью операций, выполняемых в процессе сборки;
- контролировать технологические операции сборки с помощью видеокadres управления.

Полученная модель визуализации в данной статье может в будущем использоваться при проведении тренингов в отношении деятельности на ядерных объектах. Эта система позволит просматривать и организовывать стратегии, проводить обучающие семинары и давать возможность обучаться без вреда для здоровья человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонов С.В., Шакирьянова Ю.П., Пинчук П.В.* Перспективы развития трехмерного моделирования для решения судебно-медицинских экспертных задач: BIM-технология и 4D-моделирование // Судебная медицина. 2020. № 6 (157). С. 431–446.
2. *Григорьева Е.В.* Компьютерное моделирование и проектирование редуктора с использованием системы трехмерного моделирования // Естественные и технические науки. 2021. № 6 (157). С. 431–446.
3. Моделирование в среде трехмерной графики как метод формирования критического мышления обучающихся / *Е.А. Мамаева, Н.И. Исаева, Т.В. Маширова, Н.Н. Векуа* // Перспективы науки и образования. 2021. № 2 (50). С. 431–446.
4. *Laidani Z., Tolokonsky A.O., Abdulraheem K.K., Ouahioune and R Berreksi M.* Modelling and simulating of a multiple input and multiple output system to control the liquid level and temperature by using model predictive control // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1689. № 1.
5. *Zhukov I.M., Tolokonsky A.O.* Ultimate design and testing TPTS-based control systems with using full-scaled physical models of nuclear power plants // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 498. № 1. Q4.
6. *Колдобский А.Б.* 100 вопросов и ответов от атомной энергетики // Топливная компания РОСАТОМ: ТВЭЛ. 2017. С. 140.
7. Руководство пользователя 62881726.42 5279 0.006.ИЗ: АСУТП линии сборки ТВС // АО «НЗХК-инжиниринг». 2019. С. 52.
8. Описание алгоритма 62881726.42 5270 0.006.ПБ АСУТП линии сборки ТВС // АО «НЗХК-инжиниринг». 2019. С. 33.
9. Руководство пользователя (администратора) 62881726.42 5510 4.007.ИЗ СВН линии сборки ТВС // АО «НЗХК-инжиниринг», 2019. С. 33.
10. Рабочая инструкция по эксплуатации участка сборки и контроля ТВС РИ110/08-068-2018 АО «Сибирский химический комбинат». 2019. С. 33.
11. Рабочая инструкция по эксплуатации системы видеонаблюдения линии сборки ТВС РИ 110/12-029-2019 АО «Сибирский химический комбинат». 2018. С. 33.

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2022, vol. 11, no. 6, pp. 413–424

---

**DEVELOPMENT OF A VIRTUAL SIMULATOR FOR TRAINING PERSONNEL  
IN ASSEMBLING FUEL ELEMENTS FOR VVER-1000 NUCLEAR PLANT**

**D.G. Kovalionok<sup>1</sup>, A.O. Tolokonskiy<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409 Russia*

*\*e-mail: toloconne@yandex.ru*

Received January 9, 2023; revised January 12, 2023; accepted January 24, 2023

With the development of computer technology, it became possible to simulate and develop training systems for various complex and dangerous control objects that widely use computer graphics. Initially, computer graphics were used mainly for projects in the gaming entertainment industry, such as movies and games applications, and, in parallel, the first computer models of control objects appeared. The development of computer graphics technologies makes it possible to create three-dimensional models for technical systems of nuclear power. Modeling in three-dimensional space makes it possible to create fundamentally new computer simulators for training NPP operating personnel. This article is devoted to the development of software for the rapid installation of the layout of fuel assemblies. Information about the architecture of the training system, its composition and description, as well as the visual part are given. Mnemonic control schemes for the assembly line of fuel rod installations have been developed. The developed simulator provides visual information in the FA assembly area. Installations were visualized such as a table for supplying components, a roller table for supplying VTUK, an installation for dismantling a magazine with fuel rods, an installation for positioning fuel rods along a coordinate, an installation for assembling a fuel bundle, an autooperator, and a temporary storage shelter. The resulting visualization model in this article can be used in the future to create teaching and training systems at nuclear facilities.

*Keywords:* training simulators, 3D modeling, graphic objects, fuel assembly, visual presentation.

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА  
ПО СБОРКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ СТАНЦИИ ВВЭР-1000

REFERENCES

1. Leonov S.V., Shakiryanova Yu.P., Pinchuk P.V. Prospects for the development of three-dimensional modeling for solving forensic expert tasks: BIM technology and 4D modeling. Forensic medicine. 2020. No. 6 (157). P. 3–134 (in Russian).
2. Grigoryeva E.V. Computer modeling and design of a gearbox using a three-dimensional modeling system. Natural and technical sciences. 2021. No. 6 (157). P. 31–146 (in Russian).
3. Mamaeva E.A., Isupova N.I., Masharova T.V., Vekua N.N. Modeling in the environment of three-dimensional graphics as a method of forming critical thinking of students. Prospects of science and education. 2021. No. 2 (50). P. 131–446 (in Russian).
4. Laidani Z., Tolokonsky A.O., Abdulraheem K.K. Ouahioune and R Berreksi M. Modelling and simulating of a multiple input and multiple output system to control the liquid level and temperature by using model predictive control. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1689. No. 1.
5. Zhukov I.M., Tolokonsky A.O. Ultimate design and testing TPTS-based control systems with using full-scaled physical models of nuclear power plants. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 498. No. 1. Q4.
6. Koldobsky A.B. 100 questions and answers from the nuclear industry. Fuel company ROSATOM: TVEL. 2017. P. 140 (in Russian).
7. User manual 62881726.42 5279 0.006.I3: APCS of the fuel assembly assembly line. JSC NZKH-engineering. 2019. P. 52 (in Russian).
8. Description of the algorithm 62881726.42 5270 0.006. PB APCS of the FA assembly line. JSC «NCCP-engineering». 2019. P. 33 (in Russian).
9. User's (administrator's) manual 62881726.42 5510 4.007.I3 SVN of the FA assembly line. JSC «NCCP-engineering». 2019. P. 33 (in Russian).
10. Working instructions for the operation of the site for assembly and control of fuel assemblies RI110 / 08-068-2018 JSC «Siberian Chemical Plant». 2019. P. 33 (in Russian).
11. Working instructions for the operation of the video surveillance system of the TVS assembly line RI 110/12-029-2019 JSC «Siberian Chemical Plant». 2018. P. 33 (in Russian).

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

УДК 629.7.054.07

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ  
НА ТОЧНОСТЬ ВЫСТАВКИ ГИРОПЛАТФОРМЫ

© 2022 В.П. Наумченко<sup>1,\*</sup>, П.А. Илюшин<sup>1</sup>, Д.Г. Пикун<sup>1</sup>, А.В. Соловьев<sup>1</sup>  
Филиал АО «ЦЭНКИ» НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова, Москва, 111123, Россия  
e-mail: 8987nau@mail.ru

Поступила в редакцию: 24.01.2023

После доработки: 25.01.2023

Принята к публикации: 07.02.2023

В настоящей статье рассматриваются особенности решения задачи автономной начальной выставки платформенной инерциальной навигационной системы при влиянии шумов инерциальных датчиков (гироскопов и акселерометров). Известный классический алгоритм начальной выставки, включающий этапы грубой выставки, горизонтирования и гирокомпасирования, имеет обширное применение и достаточно подробно описан в технической литературе. Его ключевым недостатком являются значительные временные затраты на проведения всех этих этапов. В связи с этим с целью увеличения быстродействия проведения начальной выставки при заданном уровне точности предлагается применение нового алгоритма, совмещающего в себе упомянутые выше этапы и основанного на применении методов многофакторной оптимизации. На основе показаний не менее трех гироскопов и не менее трех акселерометров осуществляется оптимизация пространственного положения гироплатформы путем физического ее приведения в требуемое начальное положение. Алгоритм построен на базе метода градиентного спуска с переменным шагом. Проведено имитационное моделирование двухэтапного алгоритма и оптимизационного в невозмущенном режиме и при воздействии типовых для инерциальных датчиков шумов, как основных источников ошибок при начальной выставке. Представлены типовые шумы, их отображения в частотной и временной областях, их отличительные особенности. Значительный выигрыш в быстродействии оптимизационного алгоритма открывает широкие перспективы для его применения, поскольку арсенал соответствующих методов многогранен, однако сильная зависимость точности выставки от типовых шумов требует разработки дополнительных механизмов для их подавления.

*Ключевые слова:* гироплатформа, начальная выставка, акселерометр, гироскоп, шумы, оптимизация, алгоритм.

**DOI:** <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.16>

ВВЕДЕНИЕ

Задача выведения ракет космического назначения (объектов) на целевую орбиту является крайне ответственной и сложной задачей, поскольку для развертывания спутниковой группировки или осуществления исследовательской деятельности людей в космосе на борту КС необходима их точная доставка на заданную орбиту с учетом характерной для каждого конкретного запуска и конкретной орбиты значения кругового вероятностного отклонения (КВО).

Этап выведения полезной нагрузки на орбиту включает участки, на которых происходит значительное изменение характеристик окружающей среды, а также воздействующих на объект возмущающих факторов [1]:

участок вертикального взлета в плотных слоях атмосферы, на котором проявляются мак-

симальные перегрузки по всем строительным осям изделия, а также ветровые возмущения;

участок разворота, на котором, вдобавок к перегрузкам, проявляется воздействие положительных (ионы) и отрицательных (электроны) заряженных частиц;

участок полета в ближнем космосе, когда увеличивается интенсивность воздействия тяжелых заряженных частиц.

Воздействие возмущающих факторов на двух последних участках отрицательно сказывается на навигации объекта по спутниковым навигационным системам, поскольку способствует искажению и пропаже навигационного спутникового сигнала [2, 3].

Применение других навигационных средств ограничивается условиями их применения и спецификой их ошибок [4–9]. В связи с этим навигация и ориентация объекта при его выведении осуществляется автономно при помощи

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ НА ТОЧНОСТЬ ВЫСТАВКИ ГИРОПЛАТФОРМЫ

инерциальных навигационных систем (ИНС), в настоящее время бесплатформенных (БИНС). Однако особенности их эксплуатации, связанные с невозможностью проведения калибровки на борту изделия, а также слабое демпфирование внешних вибромеханических нагрузжений, обуславливают продолжение применения ИНС платформенного типа [10].

Поскольку выведение осуществляется автономно по показаниям ИНС, то итоговая ошибка выведения будет отсчитываться от ошибки, обусловленной точностью начальной выставки. Причем, координаты запуска объекта известны с геодезической точностью, а начальные скорости пренебрежимо малы. Следовательно, начальная ошибка будет формироваться ошибкой начальной ориентации инерциального измерительного блока (ИИБ), включающего триаду акселерометров и гироскопов, относительно некоего базового географического базиса. В связи с тем, что инструментальные ошибки датчиков (нулевые сигналы, погрешности масштабного коэффициента, углы неортогональности) могут быть учтены на этапе калибровки, то основной возмущающий фактор, влияющий на точность определения начальной ориентации ИИБ, складывается из шумов инерциальных датчиков.

Общеизвестный автономный двухэтапный алгоритм начальной выставки [11–13], включающий этапы горизонтирования и гирокомпасирования, на сегодняшний день в ряде случаев не может удовлетворять требуемым критериям точности и быстродействия, поэтому задача повышения точности и сокращения времени начальной выставки ИНС остается актуальной.

В связи с этим предлагается иной подход проведения начальной выставки ИНС платформенного класса, который базируется на применении аппарата многофакторной оптимизации по показаниям инерциальных датчиков [14–16].

В статье приводится результат моделирования начальной выставки на общеизвестном двухэтапном подходе и на предлагаемом оптимизационном с учетом влияния шумов инерциальных датчиков. Осуществляется сравнительная оценка двух подходов по критерию быстродействия и точности выставки.

Для средств выведения, особенно пилотируемых аппаратов, предъявляют достаточно жесткие требования к точности начальной выставки ИНС, что приводит к жестким требованиям к

точностным параметрам ИИБ и их стабильности как от запуска к запуску, так и в запуске. Для платформенных ИНС точность начальной выставки достигается двухпозиционным гирокомпасированием и при необходимости – предполетной калибровкой. Погрешность начальной выставки платформенной ИНС по горизонтированию не превышает 10 угл. сек., по азимутальной выставке – 2 угл. мин, что обеспечивает требуемую точность выведения, в том числе и в инерциальном режиме [17].

Стоит отметить, что датчики углов в платформенных ИНС имеют погрешности на уровне единиц угловых секунд, что определяет высокую точность разворота.

### МЕТОДЫ

#### *Модель показаний датчиков*

Пусть с платформой связан ортогональный трехгранник  $Ox_{п}y_{п}z_{п}$ , где  $O$  – геометрический центр масс платформы, совпадающий с центром подвеса;  $x_{п}$  – ось платформы, совпадающая с продольной осью объекта;  $y_{п}$  – ось платформы, направленная на географический север;  $z_{п}$  – ось платформы, направленная на восток и дополняющая трехгранник до правой тройки.

С ИИБ связан ортогональный трехгранник  $Ox_6y_6z_6$ , где  $O$  – геометрический центр масс ИИБ, совпадающий с геометрическим центром масс платформы; оси  $x_6, y_6, z_6$  ИИБ совпадают с осями платформы с точностью до углов рассогласования платформы и ИИБ  $\Delta_{xy}, \Delta_{xz}, \Delta_{yx}, \Delta_{yz}, \Delta_{zy}, \Delta_{zx}$  (на рис. 1 не приведены).

Географический базовый трехгранник  $OHNE$  формирует плоскость горизонта и истинную вертикаль в месте запуска. Модули вектора угловой скорости вращения Земли  $\Omega_3 = 15.047$  град./ч и вектора ускорения свободного падения  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup> известны с геодезической точностью в месте запуска объекта. На рис. 1 приведены взаимные ориентации платформы и ИИБ на борту объекта.

Географический и платформенный трехгранники имеют рассогласование на углы  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ . Решение задачи начальной выставки заключается в том, чтобы минимизировать это рассогласование, совместив оси этих трехгранников.

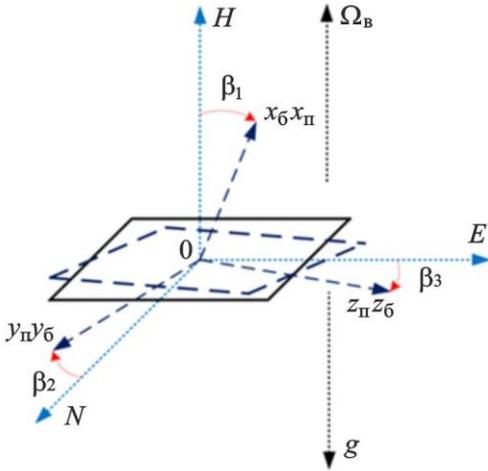


Рис. 1. Ориентации платформы и ИИБ на объекте

где  $K_{11}, K_{22}, K_{33}$  – масштабные коэффициенты гироскопов и акселерометров;  $K_{12}, K_{13}, K_{21}, K_{23}, K_{31}, K_{32}$  – коэффициенты перекрестных связей между соответствующими каналами;  $\Omega_{x,y,z}, a_{x,y,z}$  – фактические величины проекций угловой скорости вращения Земли на оси чувствительности (ОЧ) соответствующих гироскопов и проекций ускорения свободного падения

Формирование выходной информации инерциальных датчиков при решении задачи ориентации основано на формировании на рабочей частоте 100 Гц (шаг дискретизации  $dt = t_2 - t_1$ ) – проекций вектора угловой скорости вращения Земли  $\vec{\Omega}_6 = [\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z]^T$  и проекции ускорения свободного падения  $\vec{a}_6 = [a_x, a_y, a_z]^T$  на оси  $Ox_6y_6z_6$  [18].

Уравнения показаний гироскопов и акселерометров на оси платформы приведены в (1):

$$\begin{pmatrix} \Omega_{x_п} \\ \Omega_{y_п} \\ \Omega_{z_п} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta\Omega_x \\ \Delta\Omega_y \\ \Delta\Omega_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta\Omega_x \\ \delta\Omega_y \\ \delta\Omega_z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} a_{x_п} \\ a_{y_п} \\ a_{z_п} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta a_x \\ \delta a_y \\ \delta a_z \end{pmatrix},$$

на ОЧ соответствующих акселерометров;  $\Delta\Omega_{x,y,z}, \Delta a_{x,y,z}$  – систематические составляющие нулевого сигнала;  $\delta\Omega_{x,y,z}, \delta a_{x,y,z}$  – случайные составляющие нулевого сигнала.

Матрица масштабных коэффициентов и перекрестных связей определяется из следующих предположений в (2):

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} + \Delta S_{11} + \delta S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & S_{22} + \Delta S_{22} + \delta S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} + \Delta S_{33} + \delta S_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & \Delta_{xz} & -\Delta_{xy} \\ -\Delta_{yz} & 1 & \Delta_{yx} \\ \Delta_{zy} & \Delta_{zx} & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $S_{11}, S_{22}, S_{33}$  – номинальные значения масштабных коэффициентов;  $\Delta S_{11}, \Delta S_{22}, \Delta S_{33}$  – систематические погрешности масштабных коэффициентов;  $\delta S_{11}, \delta S_{22}, \delta S_{33}$  – случайные погрешности масштабных коэффициентов;  $\Delta_{xy}, \Delta_{xz}, \Delta_{yx}, \Delta_{yz}, \Delta_{zy}, \Delta_{zx}$  – углы невыставок между осями  $Ox_6y_6z_6$  и  $Ox_пy_пz_п$ .

Случайные составляющие нулевых сигналов будем рассматривать как суперпозицию белого шума  $\Omega_\xi, a_\xi$  и цветного шума  $\Omega_\varepsilon, a_\varepsilon$  в виде (3):

$$\begin{aligned} \delta a &= a_\xi + a_\varepsilon, \\ \delta \Omega &= \Omega_\xi + \Omega_\varepsilon. \end{aligned} \quad (3)$$

После проведения предстартовой калибровки большая часть компонентов в уравнении (1) будет определена и учтена при первичной обработке показаний датчиков. В таком случае уравнения показаний (1) примут вид (4):

$$\begin{pmatrix} \Omega_{x_п} \\ \Omega_{y_п} \\ \Omega_{z_п} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} + \delta S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & S_{22} + \delta S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} + \delta S_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta\Omega_x \\ \delta\Omega_y \\ \delta\Omega_z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} a_{x_п} \\ a_{y_п} \\ a_{z_п} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} + \delta S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & S_{22} + \delta S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} + \delta S_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta a_x \\ \delta a_y \\ \delta a_z \end{pmatrix}.$$

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ НА ТОЧНОСТЬ ВЫСТАВКИ ГИРОПЛАТФОРМЫ

Отсюда видно, что ключевой вклад в выходной сигнал вносят измерительные шумы. Следовательно, быстродействие и точность начальной выставки инерциальной системы будут определяться характером шумовой картины в первичных показаниях ИИБ. И для обеспечения требуемого быстродействия и точности необходимо понимание стохастической природы случайных составляющих сигналов [19].

### *Особенности и типы шумовых воздействий в сигналах инерциальных датчиков*

Шумы инерциальных датчиков представляют собой смесь белого шума и цветного. Природа возникновения некоторых типов шумов остается до сих пор неизвестной, однако можно привести их нестрогую классификацию в соответствии с рис. 2.

Природа возникновения шума	Частотный диапазон		
Нестабильность частоты дискретизации АЦП и разрешающей способности датчика	Область высоких частот	Область средних частот	Область низких частот
Нестабильность интервала внешнего обмена			
Пульсации магнитных полей			
Пульсации токов и напряжений в электронике	Область низких частот	Область низких частот	Область низких частот
Нестабильность источника питания			
Нестабильность температуры и температурных градиентов			

**Рис. 2.** Источники шумов

Случайные процессы, протекающие в электронике в процессе функционирования датчика, в основном имеют полосу пропускания в области высоких и средних частот, в то время как температурные процессы, а также долговременные изменения питающего напряжения, которое в современных приборах зачастую высокостабильно, находятся в области низких частот.

В связи с этим можно привести перечень наиболее часто встречающихся в показаниях инерциальных датчиков шумов, которые назовем типовыми. Их наименования для гироскопов и акселерометров, а также отображения в виде спектральной плотности мощности (СПМ) и вариации Аллана (ВА) приводятся в табл. 1.

**Таблица 1.** Типовые шумы инерциальных датчиков

№ п/п	Тип шума		СПМ $S(f)$	ВА $\sigma^2(\tau)$
	Гироскоп	Акселерометр		
1	Шум квантования		$(2\pi f)^2 Q^2$	$\frac{3Q^2}{\tau^2}$
2	Случайное блуждание (дрейф) угла	Случайное блуждание (дрейф) скорости	$f^0 N^2$	$\frac{N^2}{\tau}$
3	Фликкер шум (нестабильность смещения нуля)		$\frac{B^2}{2\pi f}$	$\frac{2B^2}{\pi} \varphi(\pi f \tau)$
4	Случайное блуждание (дрейф) скорости	Случайное блуждание (дрейф) ускорения	$\left(\frac{K}{2\pi f}\right)^2$	$\frac{K^2 \tau}{3}$
5	Мультипликативная систематическая составляющая		$\frac{R^2}{(2\pi f)^3}$	$\frac{R^2 \tau^2}{2}$

В зависимости от методов обработки и оценки выходной информации, процесс идентификации шумов имеет различные результаты. Среди наиболее распространенных методов оценки шумовых характеристик выделяют дис-

персионный анализ для оценки шумов стационарных случайных процессов на основе определения математического ожидания (МО) и среднеквадратического отклонения (СКО) по некоторой выборке [20].

При оценке шумовых характеристик нестационарных процессов применяют метод оценки СПМ и метод ВА [21]. СПМ описывает распределение мощности сигнала в зависимости от частоты и имеет размерность мощности, деленной на частоту [Дж/Гц].

Между ВА и СПМ имеется связь, определяемая выражением [22]:

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^\infty S_\Omega(f) \frac{\sin^4 \pi f \tau}{(\pi f \tau)^2} df, \quad (5)$$

где  $S_\Omega(f)$  – СПМ случайного процесса  $\Omega(\tau)$ .

Уравнение (5) является основным звеном ВА и используется для определения его дисперсии из СПМ. Это выражение соответствует фильтру с передаточной функцией  $\sin^4(x)/(x)^2$ . Согласно этому выражению, можно получить величину ВА  $\sigma^2(\tau)$  как функцию длины периода усреднения, но из-за отсутствия обратного соотношения определить СПМ по ВА невозможно, а значит, нельзя и количественно оценить характеристики шумов.

Так как значение  $\sigma^2(\tau)$  является фактически измеряемой величиной, полученная кривая Аллана позволяет идентифицировать случайные процессы, существующие в виде смеси в выходных информационных потоках каждого датчика [23].

Рассмотрим подробнее идентификационные признаки типовых шумов, приведенных в табл. 1:

1. Шум квантования (Quantization noise) – возникает в результате проведения оцифровки первичных аналоговых данных вследствие ограничения разрядной сетки АЦП и округления результатов преобразования. Этот тип шума может быть описан следующим дифференциальным уравнением:

$$\sigma_{qn}(\tau) = Q\sqrt{T}\xi(t), \quad (6)$$

где  $Q$  – коэффициент вариации Аллана для шума квантования;  $T$  – период дискретизации;  $\xi(t)$  – единичный белый шум.

Таким образом, шум квантования описывается производной от белого шума. На кривой Аллана имеет наклон  $-1$ ;

2. Случайное блуждание угла, скорости (Angle random walk, ARW) – аддитивный белый шум, который воздействует на результат интегрирования и представляет случайное отклонение от ожидаемых значений. При нахождении датчика в состоянии покоя выходной сигнал после интегрирования должен иметь нулевое значение, однако из-за влияния белого шума

данные датчика изменяются случайным образом, а дисперсия становится пропорциональна времени. ARW может быть описан дифференциальным уравнением вида

$$\dot{\sigma}_{ARW}(\tau) = N\xi(t), \quad (7)$$

где  $N$  – коэффициент вариации Аллана для ARW.

Для гироскопов имеет размерность  $^\circ/\sqrt{ч}$ , а для акселерометров –  $м/с/\sqrt{ч}$ . На кривой Аллана имеет наклон  $-1/2$ ;

3. Фликкер-шум – возникает вследствие случайного мерцания в электронных компонентах датчика. Оказывает значительное влияние на низких и средних частотах, на высоких частотах перекрывается белым шумом. Может быть описан следующим выражением:

$$\dot{\sigma}_{fl}(\tau) = -\beta\sigma_{fl}(\tau) + \beta B\xi(t), \quad (8)$$

где  $\beta$  – обратная постоянная времени;  $B$  – коэффициент вариации Аллана для фликкер-шума.

На кривой Аллана имеет нулевой наклон;

4. Случайное блуждание скорости, ускорения (Rate random walk, RRW) – является винеровским случайным процессом, который формируется интегрированием белого шума с передаточной функцией  $1/p$ . Относится к шумам неизвестной природы с очень большим временем корреляции. Может быть описан выражением

$$\dot{\sigma}_{RRW}(\tau) = K\xi(t), \quad (9)$$

где  $K$  – коэффициент вариации Аллана для RRW.

На кривой Аллана имеет наклон  $1/2$ ;

5. Мультипликативная систематическая составляющая – является более детерминированной ошибкой, чем стохастическая. Ее присутствие в данных может указывать на медленное изменение характеристик датчика в течение длительного периода времени. Также может быть вызвана малыми ускорениями основания в течение длительного периода времени;

6. Экспоненциально-коррелированный марковский шум – характеризуется экспоненциальной функцией затухания  $K_M(\tau)$  с конечным временем корреляции. Может быть описан выражением

$$K_M(\tau) = D_M \cdot e^{-\mu|\tau|}, \quad (10)$$

где  $D_M$  – дисперсия шума [ $рад^2/с^2$ ],  $\mu$  – коэффициент затухания функции  $K_M(\tau)$  [ $с^{-1}$ ], связанный со временем корреляции соотношением  $T_M = 1/\mu$ .

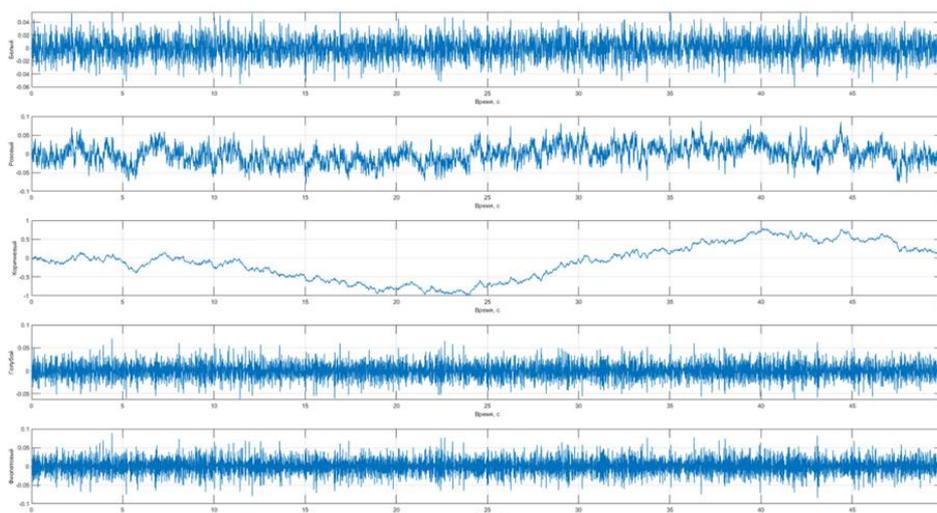
## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ НА ТОЧНОСТЬ ВЫСТАВКИ ГИРОПЛАТФОРМЫ

На кривой Аллана находится в диапазоне от  $1/2$  до  $-1/2$  и при большой интенсивности белого шума может им перекрываться.

Первые четыре типа шумов наиболее распространены в показаниях инерциальных датчиков навигационного типа. Поэтому в рамках работы будут рассматриваться именно эти типы шумов. Разделим их интерпретацию по цвету: шум квантования будет складываться из высо-

кочастотных фиолетового и синего шумов, фликкер-шум будет определяться розовым шумом, а RRW будет определять красным (коричневым) шумом [22].

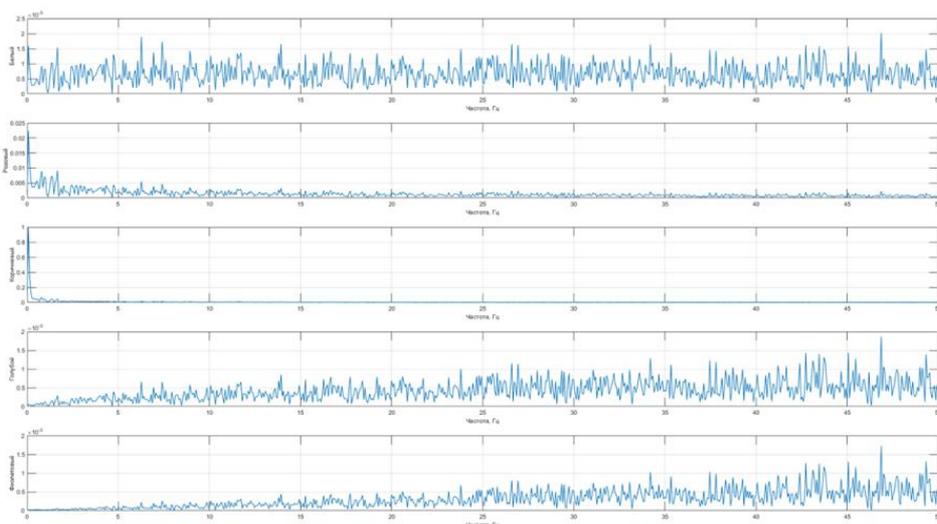
На рис. 3 приведены отображения типовых нормированных несмещенных шумов (в соответствии с табл. 1) во временной области, а на рис. 4 – в частотной.



**Рис. 3.** Шумы инерциальных датчиков во временной области – сверху-вниз: белый, розовый, красный, синий, фиолетовый

Из рис. 3 видно, что высокочастотные шумы, а именно фиолетовый, синий и белый, визуально имеют схожий характер при времени оценивания, характерном для процесса выставки. Иная ситуация видится для шумов средних и низких частот – розового и красного. Отчетливо проявляется периодичность, и относительная

амплитуда имеет большие величины, чем для высокочастотных шумов, особенно у красного шума. Можно положить, что разница в уровне шума между красным и остальными шумами отличается на порядок (0.1 – максимальное для остальных и 1 – для красного).



**Рис. 4.** Шумы инерциальных датчиков в частотной области – сверху-вниз: белый, розовый, красный, синий, фиолетовый

Рис. 4 показывает максимальное усиление относительной СПМ для красного и розового (в меньшей степени) на нулевой частоте. Это подтверждает наличие низкочастотных процессов в структуре этих шумов. Ограничиваясь диапазоном полосы пропускания для навигационного класса датчиков, СПМ белого, синего и фиолетового шумов имеют в высокой степени схожесть.

*Классическая двухэтапная начальная выставка платформы*

Автономная начальная выставка ИНС платформенного класса включает два основных этапа: горизонтирование и гирокомпасирование. В случае значительного рассогласования осей платформы и географического трехгранника дополнительно включают этап грубой выставки для ускоренного приведения платформы к плоскости горизонта с точностью до единиц градусов.

Этап горизонтирования осуществляется по сигналам горизонтальных акселерометров, которые в плоскости горизонта должны показывать величины близкие к нулю, с точностью, определяемой уровнем их шумов.

Изначально сигналы горизонтальных акселерометров отличны от нуля вследствие отклонения платформы от плоскости горизонта. Пройдя через усилители, сигналы подаются на датчики моментов, которые формируют управляющие сигналы на двигатели стабилизации для поворота платформы в горизонт до обнуления выходных показаний акселерометров. Углы крена и тангажа определяются по показаниям датчиков углов, установленных по горизонтальным осям кардана. Процесс горизонтирования может длиться около 2 мин.

Для физического совмещения осей трехгранника платформы с осями географического трехгранника используются сигналы акселерометров  $a_{x_n}$  и  $a_{y_n}$ , по которым в БЦВМ формируются управляющие угловые скорости  $\omega_{px}$ ,  $\omega_{py}$ , подаваемые на датчики моментов гироскопов горизонтальных каналов:

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= a_{x_n} - k_1 \cdot V_x, \\ \dot{V}_y &= a_{y_n} - k_1 \cdot V_y, \\ \omega_{py} &= \Omega_{y_n} + k_2 \cdot \frac{V_x}{R}, \\ \omega_{px} &= \Omega_{x_n} + k_2 \cdot \frac{V_y}{R}, \\ \omega_{pz} &= \Omega_{z_n}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $V_x, V_y$  – линейные скорости ИНС;  $k_1, k_2$  – коэффициенты усиления контуров горизонтирования;  $R$  – радиус Земли.

Параметры  $k_1$  и  $k_2$  для различных этапов могут дискретно изменяться. Например, для ускорения быстрогодействия при значительном начальном рассогласовании платформы относительно горизонта они могут принимать следующие значения:  $k_1 = 0.1 \div 0.2$  1/с;  $k_2 = 4000 \div 5000$  1/с. Для снижения полосы пропускания контуров и увеличения точности горизонтирования при малом рассогласовании платформы и плоскости горизонта коэффициенты уменьшаются и в зависимости от конфигурации системы могут принимать значения  $k_1 = 0.01 \div 0.04$  1/с;  $k_2 = 100 \div 300$  1/с.

При выставке на неподвижном основании линейные скорости  $V_x$  и  $V_y$  представляются как ошибки в определении скорости (шум первого интегратора). Тогда, подставляя соответствующие проекции из (1), представим (11) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_x &= ((S_{11} + \delta S_{11}) \cdot g + \delta a_x) \cdot \Phi_x - k_1 \cdot \Delta V_x, \\ \Delta \dot{V}_y &= ((S_{22} + \delta S_{22}) \cdot g + \delta a_y) \cdot \Phi_y - k_1 \cdot \Delta V_y, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\Phi_x, \Phi_y$  – углы отклонения платформы от плоскости горизонта.

Отклонение платформы от плоскости горизонта  $\Phi_x, \Phi_y$  можно рассматривать как суммарную погрешность, вызванную ошибками  $\Theta_x, \Theta_y$  управления платформой и ошибками  $\Psi_x, \Psi_y$  стабилизации, зависящими от инструментальных погрешностей гироскопов  $\Omega_{x_n}$  и  $\Omega_{y_n}$ :

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \Theta_x + \Psi_x, \\ \Phi_y &= \Theta_y + \Psi_y. \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнение (13) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_x &\cong k_2 \cdot \frac{\Delta V_y}{R} + \delta \Omega_{x_n}, \\ \dot{\Phi}_y &\cong k_2 \cdot \frac{\Delta V_x}{R} + \delta \Omega_{y_n}. \end{aligned} \quad (14)$$

Первый член (14) – приближенное уравнение ошибки управления.

Преобразуя уравнение, получим значение в установившемся режиме:

$$\Phi_x \cong \frac{R \cdot k_1}{k_2} \cdot \frac{1}{((S_{22} + \delta S_{22}) \cdot g + \delta a_y)} \cdot \delta \Omega_{x_n}, \quad (15)$$

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ НА ТОЧНОСТЬ ВЫСТАВКИ ГИРОПЛАТФОРМЫ

$$\Phi_y \cong \frac{R \cdot k_1}{k_2} \cdot \frac{1}{((S_{11} + \delta S_{11}) \cdot g + \delta a_x)} \cdot \delta \Omega_{yп.}$$

Уравнение (15) показывает, что установившееся значение ошибок горизонтирования определяется в первую очередь шумами гироскопов и акселерометров.

Начальное значение угла азимута определяется из соотношения

$$\psi = -\arctg g \frac{\Delta V_y}{\Delta V_x}, \quad (16)$$

на основе которого формируется сигнал для разворота платформы в плоскости меридиана, который также пропорционален шумам датчиков:

$$\omega_{pz} \cong \delta \Omega_{zп} + f(\psi(\delta a_x, \delta a_y)). \quad (17)$$

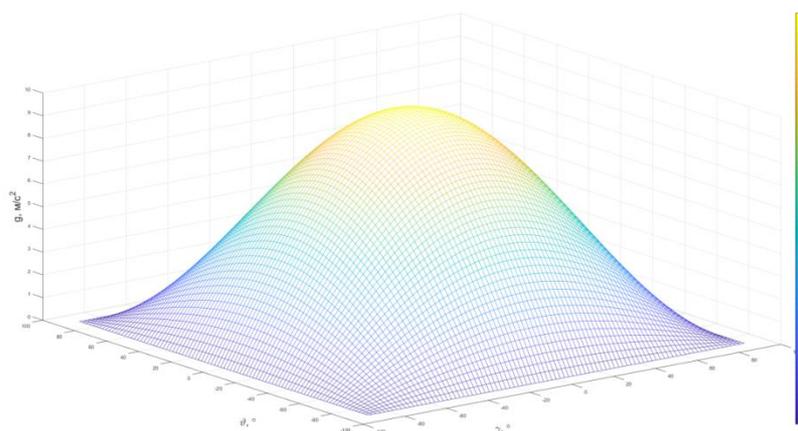
Таким образом, рассмотрен классический автономный двухэтапный алгоритм начальной

выставки платформы с учетом шумов в показаниях инерциальных датчиков, которые являются основными ошибками на этапах горизонтирования и гироскомпасирования.

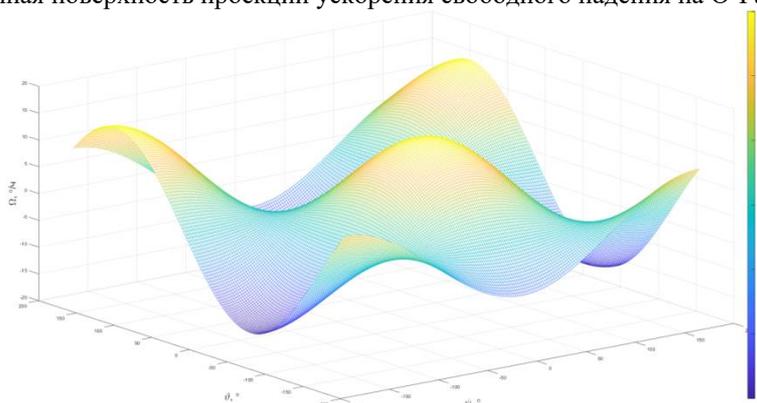
### *Оптимизационный алгоритм начальной выставки*

С целью снижения времени выставки, повышения точности и качества динамических характеристик системы можно проводить этапы горизонтирования и гироскомпасирования параллельно, решая задачу пространственной оптимизации положений осей чувствительности (ОЧ) датчиков [14–16].

Распределение проекций ускорения свободного падения и угловой скорости вращения Земли на ОЧ акселерометров в зависимости от их ориентаций в географической системе координат представлены на рис. 5 и 6.



**Рис. 5.** Уровенная поверхность проекций ускорения свободного падения на ОЧ акселерометров



**Рис. 6.** Уровенная поверхность проекций угловой скорости вращения Земли на ОЧ гироскопов

Из рисунков видно, что максимальное значение показаний акселерометров при совпадении с направлением ускорения силы тяжести, а минимальное (при рассмотрении модуля) – при их расположении в плоскости горизонта. Показания гироскопов в плоскости горизонта дости-

гают своих максимальных показаний при направлении на истинный меридиан.

Значит, рассматривать задачу начальной выставки можно с точки зрения обеспечения оптимальности показаний инерциальных датчиков.

Под оптимальностью в данном случае будем понимать совмещенность осей географического сопровождающего базиса и базиса, образованного ортогональной триадой осей инерциальных датчиков с погрешностью, не превышающей заданные требования к точности начальной выставки. В ряде случаев, специфическая геометрия ИИБ не позволит решить задачу в явном виде по причине невозможности прямого физического совмещения базисов (например, конусная геометрия ИИБ). В таком случае производится совмещение самой платформы и географического базиса с учетом пересчета показаний

датчиков ИИБ в географический базис. Таким образом, добавляется лишь дополнительный блок пересчета, который можно реализовать в программном виде.

Такой подход к построению алгоритма начальной выставки в высокой степени схож с оптимальным синтезом систем автоматического управления, когда создаваемая система должна обладать наилучшими с точки зрения минимизации функционала величинами, характеризующими состояние системы.

Функциональная схема, описывающая такой подход, приводится на рис. 7.

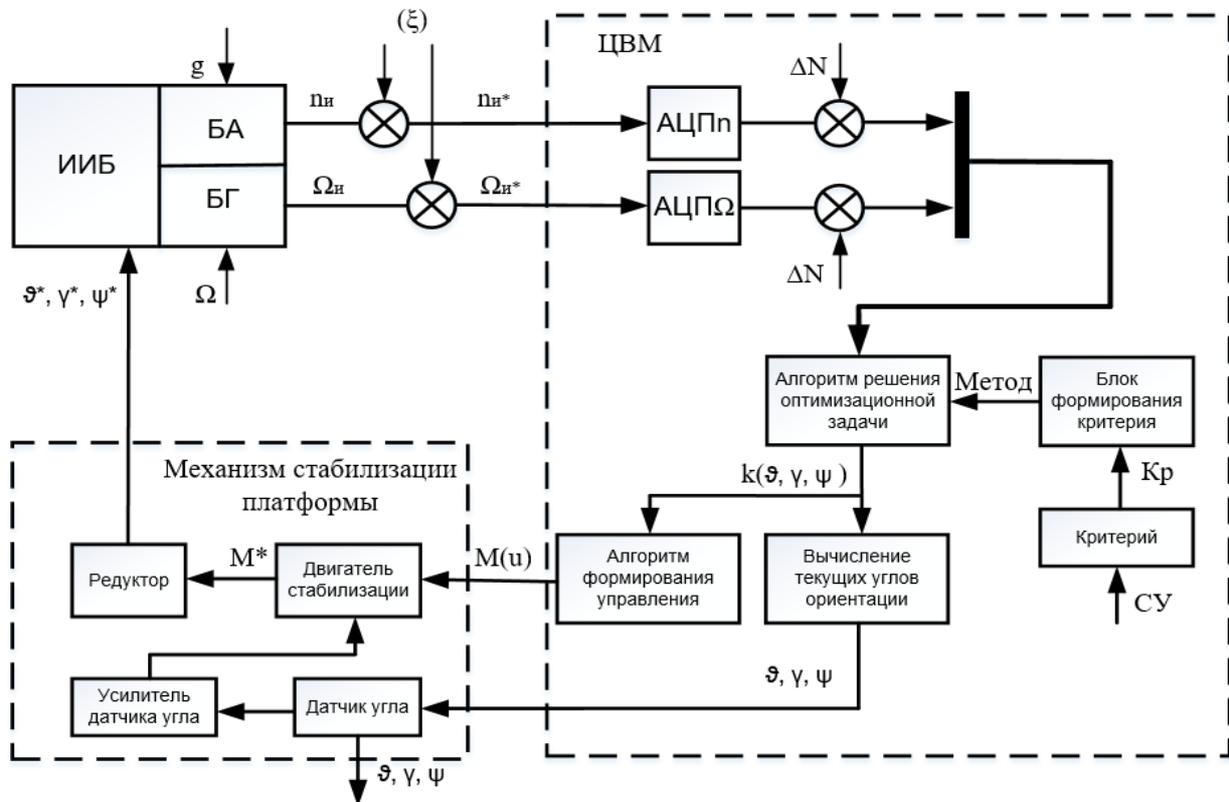


Рис. 7. Функциональная схема оптимизационного алгоритма начальной выставки

БА и БГ инерциального измерительного блока производят измерения проекций ускорения свободного падения  $g$  и угловой скорости вращения Земли  $\Omega$  на оси чувствительности соответствующих инерциальных датчиков. Измеренные параметры  $n_n$  и  $\Omega_n$  вследствие воздействия шумов отличаются от действительных и соответствуют  $n_n^*$  и  $\Omega_n^*$ . Они поступают в центральный вычислительный модуль (ЦВМ), где проходят первичное аналого-цифровое преобразование в соответствующих АЦП. Ошибки преобразования  $\Delta N$  приводят к дополнительному искажению сигналов.

Из системы управления объектом (СУ) устанавливается приоритет (критерий) для решения задачи начальной выставки – быстродействие, точность или их оптимальное соотношение, а также необходимые динамические показатели переходного процесса (колебательность, перерегулирование), после чего в блоке формирования критерия происходит установка соответствующего оптимизационного метода или методов.

На выход алгоритма поступает шаг разворота платформы по трем углам, затем он поступает в алгоритм формирования управления и блок вычисления текущих углов ориентации плат-

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ  
НА ТОЧНОСТЬ ВЫСТАВКИ ГИРОПЛАТФОРМЫ

формы, которые фиксируются датчиком угла платформы и выдаются в СУ. Величина сформированного момента поступает на двигатель стабилизации (ДС) платформы, который формирует силовое воздействие для разворота платформы одновременно на три угла. Сформированный ДС момент поступает на редуктор, который поворачивает платформу с ИИБ. Процесс может повторяться итерационно, пока показания инерциальных датчиков не достигнут областей своих экстремальных значений, определяемых уровнем шумов самих датчиков.

Математическое построение алгоритма в общем случае основывается на следующем рекуррентном соотношении:

$$\begin{aligned} W_{k+1} &= W_k + \mu p_k, \\ p_k &= -g_k + \beta_k p_{k-1}, \\ g_k &= \nabla \varepsilon(W_k). \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь  $W_k = (A_k^1 \ A_k^2 \ A_k^3 \ G_k^1 \ G_k^2 \ G_k^3)^T$  – вектор показаний акселерометров  $A_k^i$  и датчиков угловой скорости  $G_k^i$ ;  $\mu$  – скорость поиска экстремума;  $p_k$  – направление поиска экстремума;  $g_k$  – градиент показаний;  $\nabla \varepsilon$  – допустимая ошибка выставки.

Направление поиска в (18) определяется значением градиента  $g_k$  на текущем шаге  $k$ , направлением поиска на предыдущем шаге  $p_{k-1}$  и вектором коэффициентов  $\beta_k$ . Способы выбора коэффициентов вектора  $\beta_k$  получили собственные названия [24].

Критерий окончания поиска состоит в достижении заданной точности выставки или лимита по времени:

$$\varepsilon_{\text{огр}} = \begin{cases} t_i \geq t_{\text{max}}, \\ |\vartheta_i - \vartheta_{i-1}| \leq \Delta \varepsilon_{\vartheta}, \\ |\gamma_i - \gamma_{i-1}| \leq \Delta \varepsilon_{\gamma}, \\ |\psi_i - \psi_{i-1}| \leq \Delta \varepsilon_{\psi} \end{cases} \quad (19)$$

где  $t_i$  – текущий момент времени;  $t_{\text{max}}$  – программно заданное максимально допустимое время выставки;  $\vartheta_i, \gamma_i, \psi_i, \vartheta_{i-1}, \gamma_{i-1}, \psi_{i-1}$  – полученные углы разворота платформы на соседних тактах осреднения выходной информации;  $\Delta \varepsilon_{\vartheta}, \Delta \varepsilon_{\gamma}, \Delta \varepsilon_{\psi}$  – допуски на ошибки выставки по соответствующим каналам.

Учитывая тот факт, что проекции ускорения свободного падения и угловой скорости вращения Земли на ОЧ инерциальных датчиков являются функциями углов ориентации и угловой

скорости вращения платформы, матрица Якоби примет следующий вид:

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial \alpha_k^1}{\partial A_k^1} & \frac{\partial \alpha_k^1}{\partial A_k^2} & \frac{\partial \alpha_k^1}{\partial A_k^3} & \frac{\partial \alpha_k^1}{\partial G_k^1} & \frac{\partial \alpha_k^1}{\partial G_k^2} & \frac{\partial \alpha_k^1}{\partial G_k^3} \\ \frac{\partial \alpha_k^2}{\partial A_k^1} & \frac{\partial \alpha_k^2}{\partial A_k^2} & \frac{\partial \alpha_k^2}{\partial A_k^3} & \frac{\partial \alpha_k^2}{\partial G_k^1} & \frac{\partial \alpha_k^2}{\partial G_k^2} & \frac{\partial \alpha_k^2}{\partial G_k^3} \\ \frac{\partial \alpha_k^3}{\partial A_k^1} & \frac{\partial \alpha_k^3}{\partial A_k^2} & \frac{\partial \alpha_k^3}{\partial A_k^3} & \frac{\partial \alpha_k^3}{\partial G_k^1} & \frac{\partial \alpha_k^3}{\partial G_k^2} & \frac{\partial \alpha_k^3}{\partial G_k^3} \\ \frac{\partial \dot{\alpha}_k^1}{\partial A_k^1} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^1}{\partial A_k^2} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^1}{\partial A_k^3} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^1}{\partial G_k^1} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^1}{\partial G_k^2} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^1}{\partial G_k^3} \\ \frac{\partial \dot{\alpha}_k^2}{\partial A_k^1} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^2}{\partial A_k^2} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^2}{\partial A_k^3} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^2}{\partial G_k^1} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^2}{\partial G_k^2} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^2}{\partial G_k^3} \\ \frac{\partial \dot{\alpha}_k^3}{\partial A_k^1} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^3}{\partial A_k^2} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^3}{\partial A_k^3} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^3}{\partial G_k^1} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^3}{\partial G_k^2} & \frac{\partial \dot{\alpha}_k^3}{\partial G_k^3} \end{pmatrix} \cdot (20)$$

Таким образом, на каждом шаге работы алгоритма необходимы вычисления матрицы (20), что в ряде случаев может привести к увеличению времени сходимости и значительным вычислительным нагрузкам. С целью повышения быстродействия возможно уменьшение размера матрицы до размерности 3х6 путем исключения либо углов  $\alpha_{1,2,3}$ , либо угловых скоростей  $\dot{\alpha}_{1,2,3}$  (гораздо реже). С другой стороны, в окрестности экстремума возможно увеличение размера матрицы до 9х6 путем ввода угловых ускорений  $\ddot{\alpha}_{1,2,3}$  с целью наблюдения за динамикой более высокого порядка.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведем имитационное моделирование двухэтапного алгоритма и оптимизационного. Начальные значения углов отклонения платформы от плоскости горизонта для углов крена и тангажа  $2^\circ$  и  $3^\circ$ , а для угла курса –  $1^\circ$ . Критерием окончания выставки принимаем вхождение углов в диапазон  $\pm 0,05^\circ$  (3'). В качестве чувствительного элемента (ЧЭ) принимаем волоконно-оптический гироскоп и вибрационно-струнный акселерометр с уровнями шумов, не превышающими  $10^{-3}$  °/ч и  $10^{-5}$  м/с<sup>2</sup> соответственно.

На рис. 8 приводится результат моделирования двухэтапного алгоритма без учета шумов датчиков.

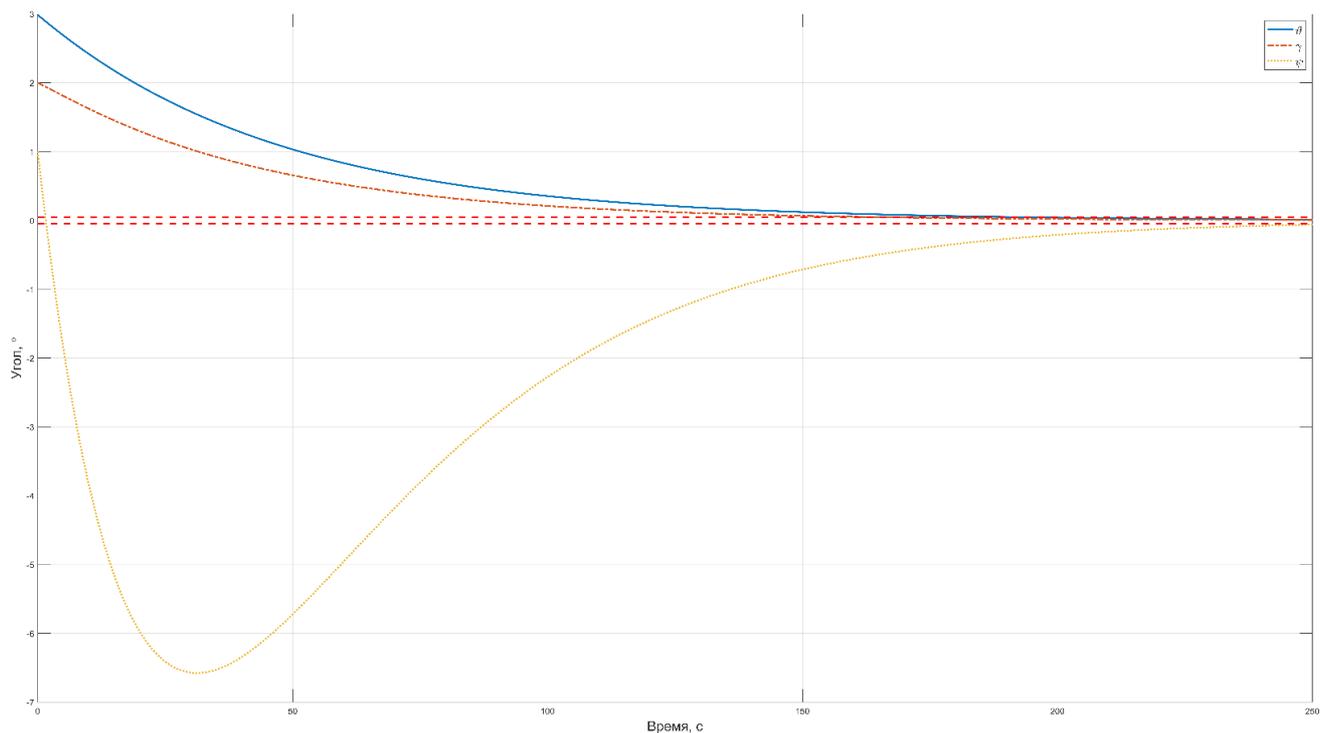


Рис. 8. Погрешности выставки ИНС без наличия шумов для двухэтапного алгоритма

На рис. 9 приводится результат моделирования оптимизационного алгоритма без учета шумов датчиков.

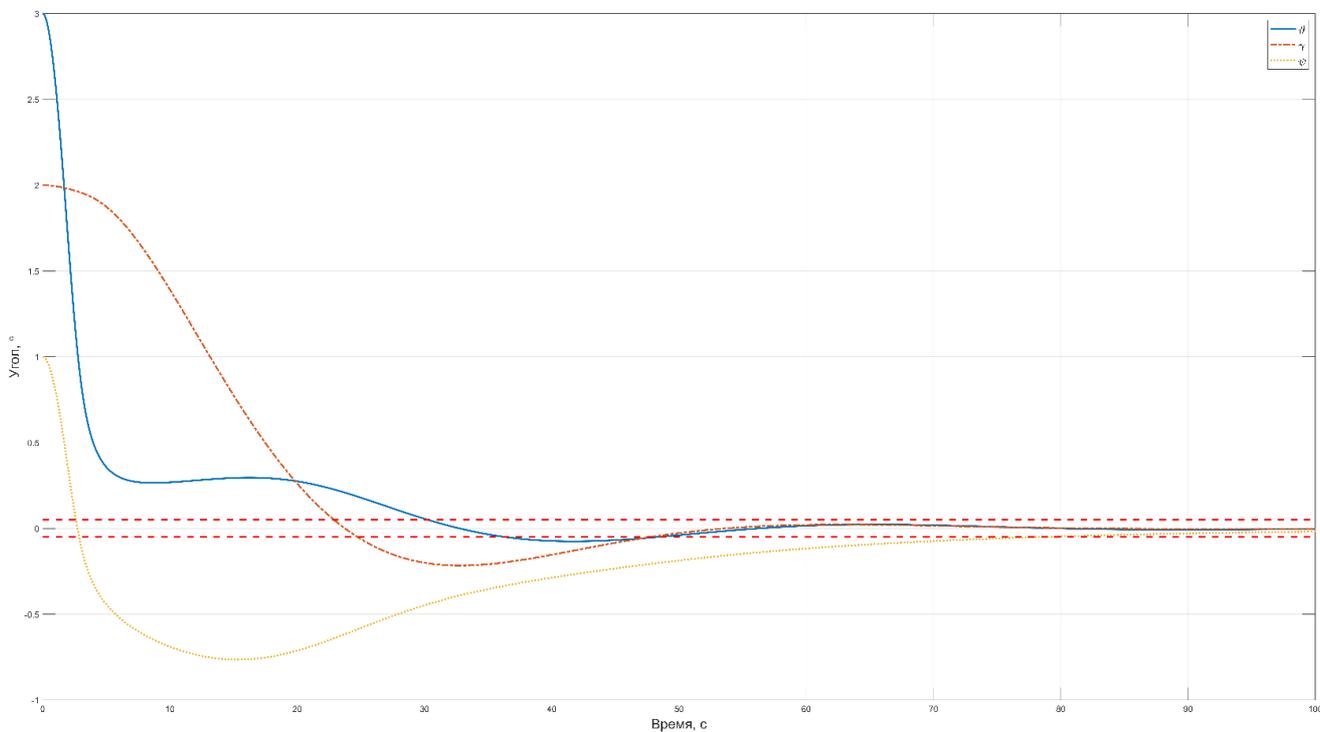


Рис. 9. Погрешности выставки ИНС без наличия шумов для оптимизационного алгоритма

В табл. 2 и 4 приводятся время выставки платформы в невозмущенном режиме, а также относительное увеличение времени выставки

при влиянии шумов датчиков для двухэтапного алгоритма и оптимизационного.

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ  
НА ТОЧНОСТЬ ВЫСТАВКИ ГИРОПЛАТФОРМЫ**

В табл. 3 и 5 приведены математические ожидания (МО) и СКО углов крена  $\gamma$ , тангажа  $\nu$

и курса  $\psi$  в установившемся режиме после окончания алгоритма выставки.

**Таблица 2.** Время выставки двухэтапного алгоритма

Тип шума	Время выставки		
	$\nu$	$\gamma$	$\psi$
Без шума	191 с	163 с	257 с
Белый	↑ 16.2 %	↑ 21.4 %	↑ 9.7 %
Розовый	↑ 27.7 %	↑ 50.3 %	↑ 12.8 %
Красный	↑ 52.8 %	↑ 79.7 %	↑ 16 %
Синий	↑ 14.6 %	↑ 14.1 %	↑ 12 %
Фиолетовый	↑ 15.2 %	↑ 20.8 %	↑ 12.4 %

**Таблица 3.** СКО и МО углов после окончания двухэтапного алгоритма

Тип шума	СКО			МО		
	$\nu$	$\gamma$	$\psi$	$\nu$	$\gamma$	$\psi$
Без шума	–	–	–	0.01	0.03	–0.03
Белый	0.015	0.016	0.015	0.02	0.01	–0.02
Розовый	0.032	0.031	0.03	0.03	0.02	–0.01
Красный	0.29	0.32	0.21	–0.1	–0.12	–0.24
Синий	0.021	0.019	0.018	0.02	0.01	–0.01
Фиолетовый	0.020	0.019	0.019	0.02	0.01	–0.03

**Таблица 4.** Время выставки оптимизационного алгоритма

Тип шума	Время выставки		
	$\nu$	$\gamma$	$\psi$
Без шума	45 с	42 с	65 с
Белый	↑ 35.5 %	↑ 19 %	↑ 16.9 %
Розовый	↑ 51.1 %	↑ 42.8 %	↑ 38.4 %
Красный	↑ 262.2 %	↑ 359.5 %	↑ 258.4 %
Синий	↑ 55 %	↑ 40.4 %	↑ 18.4 %
Фиолетовый	↑ 75 %	↑ 45.2 %	↑ 23 %

**Таблица 5.** СКО и МО углов после окончания оптимизационного алгоритма

Тип шума	СКО			МО		
	$\nu$	$\gamma$	$\psi$	$\nu$	$\gamma$	$\psi$
Без шума	–	–	–	0.008	0.004	0.015
Белый	0.02	0.019	0.023	0.007	0.008	–0.01
Розовый	0.041	0.04	0.042	0.01	0.01	–0.01
Красный	0.31	0.27	0.29	–0.011	–0.013	–0.01
Синий	0.02	0.018	0.019	0.01	0.01	–0.017
Фиолетовый	0.017	0.018	0.018	0.004	0.005	–0.01

## ОБСУЖДЕНИЕ

Из рис. 8 видно, что угол рассогласования в горизонтальных каналах монотонно уменьшается, в то время как у курсового канала имеется перерегулирование, вероятно, вызванное карданной ошибкой, когда разворот по курсу осуществляется не в горизонтальном положении, а с некоторым отклонением. Но, в конечном итоге, все показания сошлись в требуемый точностный диапазон в 3'. Время достижения диапазона точности для каналов: 163 и 191 с для горизонтальных каналов и 257 с – для курсового. Очевидно, что такой монотонный процесс занимает продолжительный временной интервал, что может не удовлетворять требованиям оперативной готовности всей системы.

Рассматривая оптимизационный алгоритм на рис. 9, можно видеть увеличение быстродействия выставки более чем в 4 раза для горизонтальных (45 и 42 с) и курсового (65 с) каналов. При этом заметно проявление динамики платформы, заключающееся в перерегулировании для всех трех каналов, а не только для курсового. Это возникает вследствие взаимовлияния перекрестных связей угломерных каналов при одновременном развороте. Можно положить, что время выставки для горизонтальных каналов двухэтапного алгоритма соответствует аperiodическому переходному процессу, в то время как для курсового канала и всех трех каналов оптимизационного – колебательному.

По полученным табличным результатам можно положить, что наличие розового и красного шума в показаниях приводит к значительному увеличению времени выставки до 80 % для двухэтапного алгоритма и 360 % – для оптимизационного, а также к увеличению СКО сигнала в установленном режиме, которое приводит к невыполнению установленных точностных требования почти в 6 раз (0.32/0.05). Характер высокочастотных шумов (синий и фиолетовый) близок белому по критерию быстродействия и точности. В ряде случаев они могут им перекрываться.

Для успешной выставки платформы необходимы механизмы подавления и компенсации низкочастотных и среднечастотных шумов (см. рис. 2) – красного и розового. Зачастую они компенсируются на уровне самого датчика или прибора за счет термокомпенсации, магнитного экранирования или специальных алгоритмов обработки данных. Стоит отметить, что наличие шумов в показаниях оказывает влияние не только на задачу выставки, но и в схожем порядке влияет на решения задач ориентации и

навигации уже непосредственно при полете объекта.

Предлагаемый оптимизационный алгоритм на базе градиентного метода показывает свою эффективность при не возмущенном шумами режиме работы, что открывает перспективы его внедрения в будущем. Однако его эффективность сильно зависит от уровня шумов в первичных измерениях, что требует применения различных способов подавления средне- и низкочастотных шумов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено влияние шумов инерциальных датчиков ИНС платформенного класса на точность и быстродействие начальной выставки. Приведены математические соотношения, подтверждающие факт, что шумы инерциальных датчиков вносят основной вклад в точность выставки, поскольку систематические составляющие моделей ошибок определяются на этапе предстартовой калибровки и в дальнейшем учитываются в выходных показаниях.

Приведены типовые шумы инерциальных датчиков, их идентификационные признаки и приближенные модели описания. Представлены несмещенные нормированные отображения шумов датчиков во временной и частотной областях.

Предложен оптимизационный автономный алгоритм начальной выставки, заключающийся в решении задачи оптимизации положения платформы в пространстве на основе первичных показаний гироскопов и акселерометров и пространственном развороте платформы по выработанным в оптимизационном алгоритме сигналам.

Проведено имитационное моделирование двухэтапного алгоритма и оптимизационного. Более высокое быстродействие последнего (почти в 3–4 раза) открывает перспективы его применения в решении задачи начальной выставки не только платформенных ИНС, но и гироскопических компасов [25], область применения которых обширна [26–28]. Однако сильная зависимость от уровня шумов (увеличение СКО в 6 раз) и необходимость осреднения выходной информации в каждом положении накладывают внушительные ограничения. Преодолеть эти ограничения возможно модернизацией алгоритма путем применения более совершенных оптимизационных методов, арсенал которых неисчислимо на сегодняшний день, с учетом развития бортовых быстродействующих вычислителей.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ НА ТОЧНОСТЬ ВЫСТАВКИ ГИРОПЛАТФОРМЫ

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Делзье Ф.* Бортовая инерциальная система координат SpaceNaute® для европейской ракеты-носителя «Ариан-6» на основе волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 4. С. 3–13.
2. *Михайлов Н.В.* Автономная навигация космических аппаратов при помощи спутниковых радионавигационных систем. СПб.: Политехника, 2014. 362 с.
3. *Марарескул Д.И.* Способ повышения доступности навигационного обеспечения высокоорбитальных космических аппаратов по ГЛОНАСС // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 6 (52). С. 82–88.
4. *Шмидт Дж.Т.* Эксплуатация навигационных систем на основе GPS в сложных условиях окружающей среды // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 1 (104). С. 3–21.
5. *Пешехонов В.Г.* Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. № 1 (116). С. 3–11.
6. Сравнение эффектов структурных повреждений в матрицах КМОП и ПЗС, применяемых в звездных датчиках, на примере стv4000 и ФППЗ «ЛЕВ-4» / *Е.В. Белинская, А.А. Кобелева, П.С. Сметанин, Я.Д. Эльяшев, М.Е. Черняк* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 119–130.
7. Особенности измерения координат звезд оптико-электронными приборами с различными угловыми разрешениями / *Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, П.С. Сметанин, О.В. Филиппова, Я.Д. Эльяшев* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 103–112.
8. О возможности автономного определения орбиты космического аппарата / *М.Е. Прохоров, А.И. Захаров, А.О. Жуков, А.И. Гладышев, И.В. Кузнецова* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 267–273.
9. Современные датчики звездной ориентации / *М.Е. Прохоров, А.И. Захаров, А.В. Миронов, Ф.Н. Николаев, М.С. Тучин* // Физика космоса; Тр. XXXVIII Международной студенческой научной конференции. 2009. С. 170–186.
10. Проектирование бесплатформенных инерциальных навигационных систем / *Б.С. Алешин, А.В. Тювин, А.И. Черноморский, В.Е. Плеханов.* М.: МАИ-Принт, 2009. 396 с.
11. *Литтон А.* Выставка инерциальных систем на подвижном основании. М.: Наука, 1971. 168 с.
12. *Ривкин С.С., Ивановский Р.И., Костров А.В.* Статистическая оптимизация навигационных систем. Л.: Судостроение, 1976. 280 с.
13. *Андреев А.Г., Ермаков В.С., Северов В.С. и др.* Способ начальной выставки инерциальной навигационной системы. Патент РФ. № 2215994 С1. МПК G 01 С 21/18; заявитель и патентообладатель ОАО ПНППК. № 2002113869/28.
14. *Наумченко В.П.* Подход к построению алгоритма начальной выставки инерциальных навигационных систем // Сборник тезисов работ XLVIII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». 2022. С. 173–174.
15. Оптимизация процесса начальной выставки инерциальных навигационных систем / *В.П. Наумченко, П.А. Илюшин, Д.Г. Пикунов, А.В. Соловьев* // Молодежь. Техника. Космос: Общерос. молодежн. науч.-техн. конф. В 4 т. 2022. Т. 2. С. 186–189.
16. *Наумченко В.П.* Современный подход построения алгоритма начальной выставки инерциальных навигационных систем платформенного класса // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2022. № 9. С. 51–59.
17. *Бельский Л.Н., Водичева Л.В., Парышева Ю.В.* Бесплатформенная инерциальная навигационная система для средств выведения: точность начальной выставки и периодическая калибровка // Юбилейная XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2018. С. 260–263.
18. *Емельянец Г.И., Степанов А.П., Блаженков Б.А.* О начальной выставке корабельной БИНС в условиях качки // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 3 (110). С. 3–17.
19. *Илюшин П.А., Наумченко В.П., Соловьев А.В.* Анализ шумовых характеристик бесплатформенного инерциального блока космического назначения // Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основанию ПАО «РКК «Энергия», г. Королев. Сборник тезисов докладов. 2021. С. 261–263.
20. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации / *М.А. Литвин, А.А. Малюгина, А.Б. Миллер, А.Н. Степанов, Д.Е. Чикрин* // Информационные процессы. 2014. Т. 14. № 4. С. 326–339.
21. *Петрова Н.А., В.М. Полушкин.* Виды погрешностей микромеханических датчиков и методы их анализа // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1.
22. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros, 2003. 77 p.
23. О возможностях выбора метода оценки дрейфовых характеристик волновых твердотельных гироскопов ГЕ 006 на основе экспериментального подтверждения / *А.С. Новоселов, С.А. Москалев, А.А. Панко, А.В. Поспелов, Н.В., Недопекин О.Н. Лузгина* // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 53–61.
24. *Тюменцев Ю.В., Чернышев А.В.* Обучение нейронных сетей прямого распространения: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2012. 48 с.
25. *Наумченко В.П.* Построение алгоритма гирокомпасирования на основе методов одномерной без-

условной оптимизации при помощи гироскопа аналитического типа с ДУС // Сб. тезисов работ Международной молодежной научной конференции XLVII «Гагаринские чтения». 2021. С. 319–320.

26. Голованов В.А. Гироскопическое ориентирование. Учебное пособие. СПб.: СПГГИ, 2004. 92 с.

27. Артиллерийские гироскопы. Курс лекций. СПб.: Санкт-Петербургский государственный уни-

верситет информационных технологий, механики и оптики, 2010. 104 с.

28. Гироскоп с квазигармонической автокомпенсационной подставкой / А.М. Боронахин, В.Б. Дао, В.Ч. Ле, Э. Ндайишимийе // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2018. № 5. С. 82–88.

---

**Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2022, vol. 11, no. 6, pp. 425–441**

---

## **THE NOISES INFLUENCE ESTIMATION OF INERTIAL SENSORS ON THE ACCURACY OF THE GYROSCOPIC PLATFORM EXHIBITION**

**V.P. Naumchenko<sup>1,\*</sup>, P.A. Ilyushin<sup>1</sup>, D.G. Pikunov, A.V. Soloviev**

*Branch of JSC «TsENKI» - Research Institute of PM them. academician V.I. Kuznetsova, Moscow, 111123, Russia*

*\*email: 8987nau@mail.ru*

Received January 24, 2023; revised January 25, 2023; accepted February 7, 2023

This article discusses the features of solving the problem of an autonomous initial exhibition of a platform inertial navigation system under the influence of noise from inertial sensors (gyroscopes and accelerometers). The well-known classical algorithm of the initial exhibition, including the stages of rough exhibition, leveling and gyrocompassing, has extensive application and is described in sufficient detail in the technical literature. Its key disadvantage is the significant time spent on carrying out all these stages. In this regard, in order to increase the speed of the initial exhibition at a given level of accuracy, it is proposed to use a new algorithm combining the above-mentioned stages and based on the use of multifactor optimization methods. Based on the readings of at least three gyroscopes and at least three accelerometers, the spatial position of the gyro platform is optimized by physically bringing it to the required initial position. The algorithm is based on the method of gradient descent with variable pitch. Simulation modeling of a two-stage algorithm and an optimization algorithm in undisturbed mode and under the influence of typical noise for inertial sensors as the main source of errors during the initial exhibition is carried out. Typical noises, their displays in the frequency and time domains, and their distinctive features are presented. A significant gain in the speed of the optimization algorithm opens up broad prospects for its application, since the arsenal of appropriate methods is multifaceted, but the strong dependence of the accuracy of the exhibition on typical noise requires the development of additional mechanisms for their suppression.

*Keywords:* gyroscopic platform, initial exhibition, accelerometer, gyroscope, noises, optimization, algorithm.

### REFERENCES

1. Delay F. Bortovaya inercial'naya sistema koordinat SpaceNaute® dlya evropejskoj rakety-nositelya «Arian-6» na osnove volnovogo tverdotel'nogo giroskopa [Onboard inertial coordinate system SpaceNaute® for the European launch vehicle «Ariane-6» based on a wave solid-state gyroscope]. Gyroscopy and navigation. 2018. Vol. 26. No. 4. P. 3–13 (in Russian).

2. Mikhailov N.V. Avtonomnaya navigaciya kosmicheskikh apparatov pri pomoshchi sputnikovyh radio-navigacionnyh sistem [Autonomous navigation of spacecraft using satellite radio navigation systems]. St. Petersburg: Politehnika Publ. 2014. 362 p.

3. Marareskul D.I. Sposob povysheniya dostupnosti navigacionnogo obespecheniya vysokoorbital'nyh kosmicheskikh apparatov po GLONASS [A way to increase the availability of navigation support for high-orbit spacecraft according to GLONASS]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im.

akademika M.F. Reshetneva. 2013. No. 6 (52). P. 82–88 (in Russian).

4. Schmidt J.T. Ekspluatatsiya navigacionnyh sistem na osnove GPS v slozhnyh usloviyah okruzhayushchej sredy [Operation of GPS-based navigation systems in difficult environmental conditions]. Giroskopiya i navigaciya. 2019. No. 1 (104). P. 3–21 (in Russian).

5. Peshekhonov V.G. Vysokotochnaya navigaciya bez ispol'zovaniya informacii global'nyh navigacionnyh sputnikovyh sistem [High-precision navigation without using information from global navigation satellite systems]. Giroskopiya i navigaciya. 2022. Vol. 30. No. 1 (116). P. 3–11 (in Russian).

6. Belinskaya E.V., Kobeleva A.A., Smetanin P.S., Elyashev Ya.D., Chernyak M.E. Sravnenie effektov strukturnyh povrezhdenij v matricah KMOP i PZS, primenyaemyh v zvyozdnyh datchikah, na primere cmv4000 i FPPZ «LEV-4» [Comparison of structural damage effects in CMOS and CCD matrices used in stellar sensors, on the example of cmv4000 and FPPZ

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ НА ТОЧНОСТЬ ВЫСТАВКИ ГИРОПЛАТФОРМЫ

«LEV-4»). *Covremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Vol. 15. No. 6. 2018. P. 119–130 (in Russian).

7. *Avanesov G.A., Bessonov R.V., Smetanin P.S., Filippova O.V., Elyashev Ya.D.* Osobennosti izmereniya koordinat zvezd optiko-elektronnyimi priborami s razlichnymi uglovymi razresheniyami [Features of measuring the coordinates of stars with optoelectronic devices with different angular resolutions]. *Covremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. Vol. 15. No. 6. P. 103–112 (in Russian).

8. *Prokhorov M.E., Zakharov A.I., Zhukov A.O., Gladyshev A.I., Kuznetsova I.V.* O vozmozhnosti avtonomnogo opredeleniya orbity kosmicheskogo apparata [On the possibility of autonomous determination of the orbit of a spacecraft]. *Covremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. Vol. 15. No. 6. P. 267–273 (in Russian).

9. *Prokhorov M.E., Zakharov A.I., Mironov A.V., Nikolaev F.N., Tuchin M.S.* Sovremennye datchiki zvezdnoj orientacii [Modern sensors of stellar orientation]. *Fizika Kosmosa: Trudy 38 mezhdunarodnoj studentcheskoj nauchnoj konferencii*. 2009. P. 170–186 (in Russian).

10. *Aleshin B.S., Tyuvin A.V., Chernomorsky A.I., Plekhanov V.E.* Proektirovanie besplatformennykh inercial'nykh navigacionnykh sistem [Design of free-form inertial navigation systems]. Moscow, MAI-Print Publ. 2009. 396 p.

11. *Lipton A.* Vystavka inercial'nykh sistem na podvizhnom osnovanii [Exhibition of inertial systems on a movable base]. Moscow, Nauka Publ. 1971. 168 p.

12. *Rivkin S.S., Ivanovsky R.I., Kostrov A.V.* Statisticheskaya optimizatsiya navigacionnykh sistem. [Statistical optimization of navigation systems]. Leningrad: Sudostroenie Publ. 1976. 280 p.

13. *Andreev A.G., Ermakov V.S., Severov V.S., et al.* Sposob nachal'noj vystavki inercial'noj navigacionnoj sistemy [Method of initial exhibition of an inertial navigation system]. Patent RF, no. 2215994 C1. IPC G 01 C 21/18. Applicant and patent holder of JSC PNPPK. No. 2002113869/28.

14. *Naumchenko V.P.* Podhod k postroeniyu algoritma nachal'noj vystavki inercial'nykh navigacionnykh sistem [Approach to the construction of the algorithm of the initial exhibition of inertial navigation systems]. *Sbornik tezisov rabot mezhdunarodnoj molodyozhnoj nauchnoj konferencii XLVIII «Gagarinskie chteniya»*. 2022. P. 173–174 (in Russian).

15. *Naumchenko V.P., Ilyushin P.A., Pikunov D.G., Soloviev A.V.* Optimizatsiya processa nachal'noj vystavki inercial'nykh navigacionnykh sistem [Optimization of the process of the initial exhibition of inertial navigation systems]. *Molodezh'. Tekhnika. Kosmos: trudy chetyrnadcatoy obshcheros. molodezhn. nauch.-tekhn. konf.* [Youth. Technic. Cosmos: Proceedings of the fourteenth General Conference. youth. science.-tech. conf. 2022. Vol. 2. P. 186–189 (in Russian).

16. *Naumchenko V.P.* Sovremennyy podhod postroeniya algoritma nachal'noj vystavki inercial'nykh

navigacionnykh sistem platformennogo klassa [A modern approach to constructing an algorithm for the initial exhibition of inertial navigation systems of the platform class]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2022. No. 9. P. 51–59 (in Russian).

17. *Belsky L.N., Vodicheva L.V., Parysheva Yu.V.* Besplatformennaya inercial'naya navigacionnaya sistema dlya sredstv vyvedeniya: tochnost' nachal'noj vystavki i periodicheskaya kalibrovka [Free-form inertial navigation system for launch vehicles: accuracy of the initial exhibition and periodic calibration]. *Yubilejnaya XXV Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferenciya po integrirovannym navigacionnym sistemam [Jubilej XXV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]*. 2018. P. 260–263 (in Russian).

18. *Emeliantsev G.I., Stepanov A.P., Blazhnov B.A.* O nachal'noj vystavke korabel'noj BINS v usloviyakh kachki [About the initial exhibition of shipboard BINS in conditions of pitching]. *Giroskopiya i navigatsiya*. 2020. Vol. 28. No. 3 (110). P. 3–17 (in Russian).

19. *Ilyushin P.A., Naumchenko V.P., Soloviev A.V.* Analiz shumovykh harakteristik besplatformennogo inercial'nogo bloka kosmicheskogo naznacheniya [Analysis of noise characteristics of a strapless inertial block for space purposes]. *Tezisy dokladov XXII Nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu poleta YU.A. Gagarina, 75-letiyu raketno-kosmicheskoy otrasli i osnovaniyu PAO «RKK «Energiya»*. Korolev. *Sbornik tezisov dokladov [Abstracts of the XXII Scientific and Technical Conference dedicated to the 60th anniversary of Yuri Gagarin's flight, the 75th anniversary of the rocket and space industry and the founding of PJSC RSC Energia. Korolev. Collection of abstracts]*. 2021. P. 261–263 (in Russian).

20. *Litvin M.A., Malyugina A.A., Miller A.B., Stepanov A.N., Chikrin D.E.* Tipy oshibok v inercial'nykh navigacionnykh sistemah i metody ih approksimatsii [Types of errors in inertial navigation systems and methods of their approximation]. *Informatsionnye processy*. 2014. Vol. 14. No. 4. P. 326–339 (in Russian).

21. *Petrova N.A., Polushkin V.M.* Vidy pogreshnostej mikromekhanicheskikh datchikov i metody ih analiza [Types of errors of micromechanical sensors and methods of their analysis], *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2019. No. 1 (in Russian)

22. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros. 2003. 77 p.

23. *Novoselov A.S., Moskalev S.A., Panko A.A., Pospelov A.V., Nedopekin N.V., Luzgina O.N.* O vozmozhnostyakh vybora metoda ocenki drejfovyykh harakteristik volnovykh tverdotel'nykh giroskopov GE 006 na osnove eksperimental'nogo podtverzhdeniya [On the possibilities of choosing a method for estimating the drift characteristics of GE 006 wave solid-state gyroscopes based on experimental confirmation]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*. 2021. No. 2. P. 53–61 (in Russian).

24. *Tyumentsev Yu.V., Chernyshev A.V.* Obuchenie nejronnyh setej pryamogo rasprostraneniya: Uchebnoe posobie. [Training of neural networks of direct propagation: a textbook]. M.: MAI Publ. 2012. 48 p.

25. *Naumchenko V.P.* Postroenie algoritma girokompasirovaniya na osnove metodov odnomernoj bezuslovnoj optimizacii pri pomoshchi girokompasa analiticheskogo tipa s DUS [Constructing a gyrocompassing algorithm based on one-dimensional unconditional optimization methods using an analytical type gyrocompass with DUS]. Sbornik tezisov rabot mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii XLVII Gagarinskije chteniya [Collection of abstracts of the international Youth scientific conference XLVII Gagarin Readings], 2021. P. 319–320 (in Russian).

26. *Golovanov V.A.* Girokopicheskoe orientirovanie: ucheb. posobie [Gyroscopic orientation: Textbook. Stipend]. St. Petersburg, SPGGI Publ. 2004. 92 p.

27. *Artillerijskie girokompasy: kurs lekcij* [Artillery gyrocompasses: a course of lectures]. St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Spb. 2010. 104 p.

28. *Boronakhin A.M., Dao V. B., Le V. Ch., Ndayishimiye E.* Girokompas s kvazigarmonicheskoj avtokompensacionnoj podstavkoj [Gyrocompass with quasi-harmonic autocompensation stand]. Izvestiya SPBGETU LETI. 2018. No. 5. P. 82–88 (in Russian).

УДК 004.62

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ КРЕДИТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

© 2022 Е.П. Акишина<sup>1</sup>, В.В. Иванов<sup>1,2</sup>, А.В. Крянев<sup>2\*</sup>, А.С. Приказчикова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

\*e-mail: AVKryanev@mephi.ru

Поступила в редакцию: 12.01.2023

После доработки: 12.01.2023

Принята к публикации: 24.01.2023

В последние годы деревья решений и нейронные сети широко применяются в задачах компьютерного зрения, таких как распознавание объектов, классификация текстов, распознавание жестов, обнаружение спама, семантическая сегментация и кластеризация данных. В статье рассматривается применение методов деревьев решений и искусственных нейронных сетей в задаче классификации кредитных организаций как объектов экономической безопасности. Представлены результаты анализа данных о деятельности кредитных организаций с использованием разных методов деревьев решений: C5, CHAID, C&R и QUEST, а также нейронных сетей. Наивысшая общая точность классификации анализируемых объектов была достигнута с помощью алгоритма деревьев решений C5 и составила 81 %. Общая точность классификации при применении алгоритма CHAID составила 68 %, алгоритма C&R – 71 %, алгоритма QUEST – 66 %. На основании результатов алгоритма C5 сгенерирован набор правил для определения принадлежности банка к определенному классу. Согласно методам деревьев решений и нейронным сетям были отобраны наиболее информативные показатели деятельности кредитных организаций с точки зрения их разбиения на два класса: благонадежные и высоко-рисковые.

*Ключевые слова:* машинное обучение, деревья решений, нейронная сеть, классификация, кредитные организации, отмывание преступных доходов.

**DOI:** <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.12>

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, деревья решений применяются в задачах классификации (принятие решения о принадлежности объекта к одному из классов) и регрессии (предсказание значения из непрерывного диапазона). Классификация и регрессия на основе деревьев решений используются в задачах распознавания текста, информационного поиска, распознавания речи, анализе изображений, обнаружении спама, распознавания жестов и др.

В деревьях решений используется автоматическая настройка параметров алгоритма на основе обучающей выборки. Деревья решений состоят из вершин, в которых записаны проверяемые условия (в нашем случае – показатели, принимающие те или иные значения), и листьев, в которых записаны «ответы» дерева. Обучение состоит в настройке условий в узлах дерева и ответов в его листьях с целью достижения максимальной точности классификации. Деревья решений позволяют производить сегментацию анализируемых объектов, осуществ-

лять предсказание путем формирования логических правил, сокращать данные и идентифицировать взаимосвязи внутри классов [1].

На рис. 1, в качестве примера, представлено дерево решений для классификации кредитных организаций, построенное с использованием алгоритма CHAID [1]. Особенности деревьев решений являются автоматический отбор признаков, интерпретируемость, управляемость обучения, зависимость от числа обучающих примеров разных классов, риск переобучения, достаточно большая обучающая выборка [2].

### ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ К ИССЛЕДУЕМЫМ ДАННЫМ

В предыдущей работе [3] анализировалась банковская сфера в России, а именно, финансовая деятельность кредитных организаций в целях идентификации незаконной активности отдельных ее звеньев. Признаковое пространство, характеризующее операционную деятельность кредитных организаций, исследовалось посредством механизма искусственных нейронных

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ КРЕДИТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

сетей. С помощью пакета программных продуктов Statistica 6 [4] была построена архитектура нейронной сети, использовались данные финансовой отчетности № 101. Выборка данных организаций была разбита на подвыборки – обучающая 50 % экз., контрольная – 25 % экз., тестовая – 25 % экз. По каждой выборке в программе был рассчитан показатель «Производительность». Отметим, что обучающая выборка используется для обучения модели, тестовая выборка – для оценки качества модели, контрольная выборка – для выбора наилучшей модели из имеющихся. Обучающая выборка представляла собой совокупность 23 непрерывных показате-

лей и одного целевого категориального показателя – «Отзыв». Однако общую производительность по всей совокупности данных Statistica не формирует в отдельный показатель.

Перейдем к рассмотрению применения искусственных нейронных сетей к исследуемым данным о кредитных организациях. Искусственная нейронная сеть – упрощенная модель биологической нейронной сети, представляющая собой совокупность искусственных нейронов, взаимодействующих между собой [5]. В качестве модели нейронной сети использовался многослойный перцептрон, архитектура которого представлена на рис. 2.

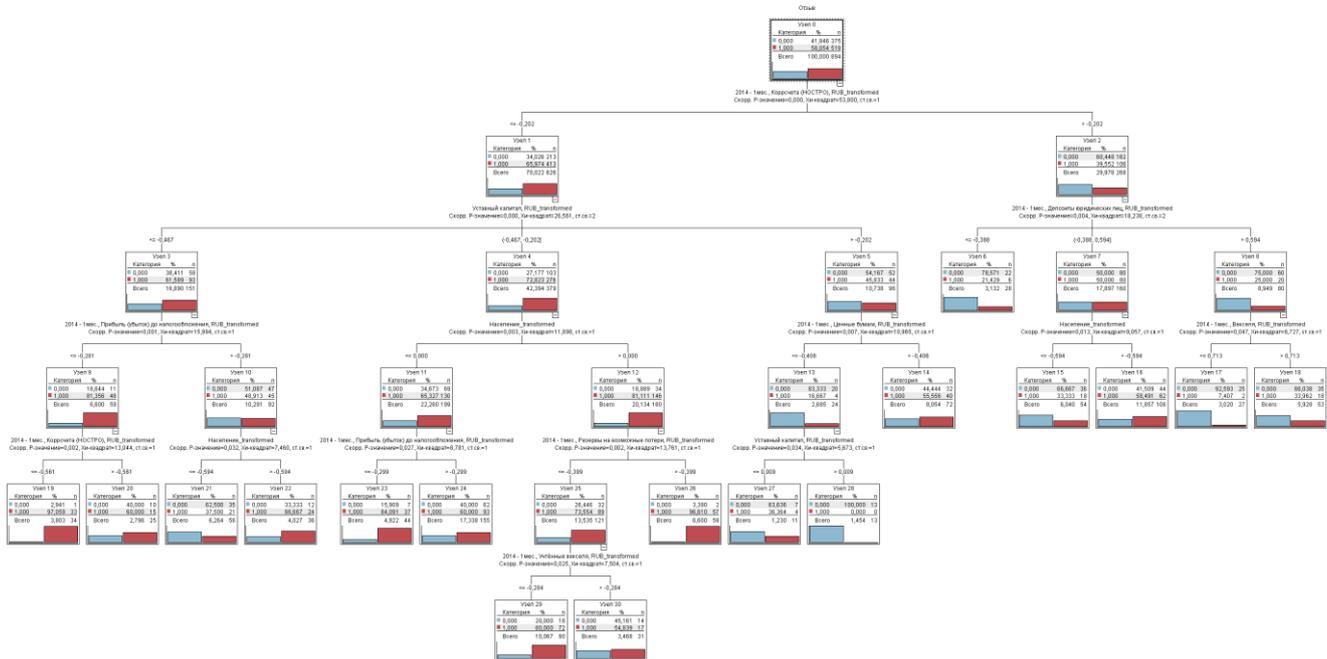


Рис. 1. Дерево решений для классификации кредитных организаций (алгоритм CHAID)

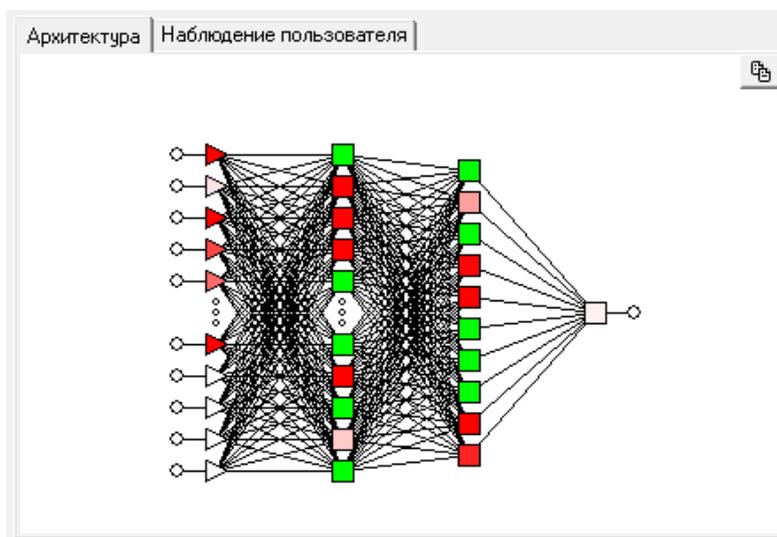


Рис. 2. Архитектура нейронной сети. Перцептрон

Наилучшей будет считаться модель нейронной сети, имеющая наивысшее значение показателя «Производительность». Производительность нейронной сети рассчитывается как отношение правильно классифицированных нейронной сетью объектов к общему количеству объектов:

$$\text{Производительность} = \frac{C}{G}, \quad (1)$$

где  $C$  – количество правильно классифицированных объектов, а  $G$  – общее количество объектов в выборке.

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

Следующим этапом исследования явилось проведение анализа признакового пространства

деятельности кредитных организаций с помощью метода главных компонент факторного анализа. В основе метода главных компонент лежат всевозможные линейные преобразования исходных признаков. В результате обработки метода из исходных признаков было сгенерировано 23 главных компоненты. На рис. 3 представлен график «каменистой осыпи», который наглядно демонстрирует вклад каждой главной компоненты в совокупную дисперсию. Из рисунка видно, что наибольший вклад дает первая главная компонента, а начиная с 12 компоненты вклад незначителен. Поэтому для дальнейшей работы можно сфокусироваться на 12 главных компонентах (из сгенерированных 23), общая совокупность дисперсии которых составляет 99 %. Авторами были проанализированы значения производительностей нейронных сетей, построенных на 23 и 12 компонентах.

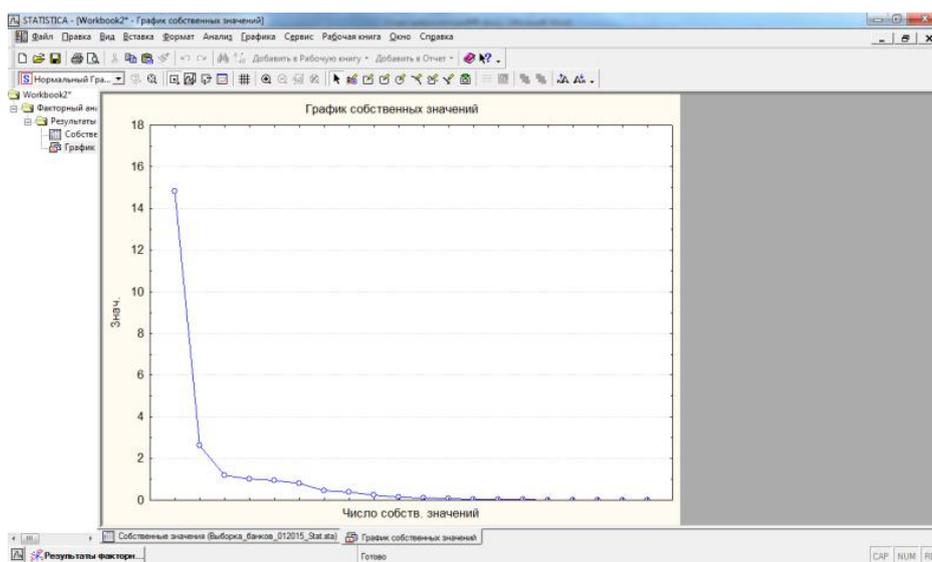


Рис. 3. График «каменистой осыпи»

На рис. 4 представлены результаты корреляционного анализа исходных показателей и сгенерированных главных компонент. Интерпретируем первые три главные компоненты. Первый фактор имеет сильную связь (высокое значение коэффициента корреляции) со следующими исходными показателями: чистые активы, ценные бумаги, кредиты, кредиты организациям, кредиты физическим лицам, основные средства, средства клиентов, средства организаций на расчетных счетах (р/с), депозиты юридических лиц, вклады физических лиц, резервы на возможные потери, капитал. В связи с чем данный фактор характеризует финансовую состоятельность банка, его платежеспособность и ак-

тивную работу с клиентами, как с физическими, так и с юридическими лицами. Второй фактор имеет высокое значение коэффициента корреляции с уставным капиталом, кредитами другим банкам, облигациями. Таким образом, вторая главная компонента характеризует финансовую возможность банка предоставлять в долг денежные средства, а также гарантировать интересы его кредиторов. Третий фактор имеет высокое значение корреляции со счетами в Банке России и коррсчетами (НОСТРО). Третья главная компонента характеризует состояние корреспондентских счетов банка, открытых в Центральном Банке России или в других банках для осуществления взаимных расчетов.

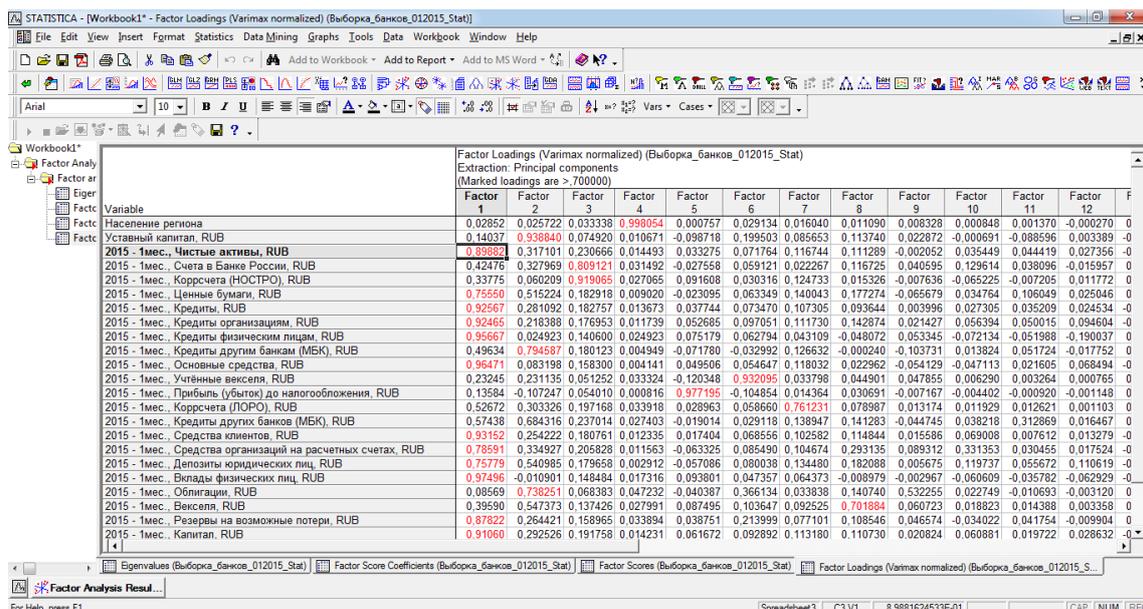


Рис. 4. Корреляция исходных показателей и главных компонент

### РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ

При сравнении методов деревьев решений и нейронной сети необходимо учесть следующее. Пакет Statistica не формирует единый показатель производительности по всей совокупности данных. А эффективность применения деревьев характеризуется показателем точности классификации. В связи с чем для процедуры сравнения данных методов следует привести показатели классификации к единой шкале измерения. Рассчитаем общую точность классификации *Accuracy* объектов:

$$Accuracy = \frac{K}{G} \quad (2)$$

(*K* – количество правильно классифицированных объектов, а *G* – общее количество объектов в выборке [6]) с использованием нейронной сети для данных 2014 и 2015 гг.

$$Accuracy_{2014} = \frac{623}{894} = 0,7, \quad (3)$$

$$Accuracy_{2015} = \frac{579}{814} = 0,71. \quad (4)$$

Аналогичные вычисления были проведены и для расчета общей точности классификации объектов с использованием нейронной сети на усеченной выборке, содержащей 12 главных компонент. Так, для данных 2014 г. значение точности классификации объектов нейронной сети на усеченной выборке составило 63 %, а для 2015 г. – 66 %.

У метрики *Accuracy* есть особенность, она подразумевает у всех объектов одинаковый вес,

что может быть не корректно в случае неравномерного распределения объектов выборки по классам. И тогда у классификатора больше информации по одному классу и, соответственно, меньше – по другому. А значит, в рамках большего класса принятые решения могут быть более адекватны. Чтобы избежать этой проблемы, можно провести сравнение методов по точности внутри каждого класса. Точность классификации в пределах класса – это доля объектов, действительно, принадлежащих данному классу, относительно всех объектов, которые система отнесла к этому классу. Эти значения рассчитываются на основании матрицы ошибок (confusion matrix). Пусть дана выборка  $x_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ,  $y_i$  – метка класса  $i$ -го объекта,  $y_i \in \{1, \dots, C\}$ ), каждый объект которой относится к одному из  $C$  классов, и классификатор  $a$ , который эти классы предсказывает. Матрицей ошибок для такого классификатора называется следующая матрица (5):

$$M = \{m_{ij}\}_{i,j=0}^C, \quad (5)$$

$$m_{ij} = \sum_{k=0}^N \mathbb{1}[a(x_k) = j] \mathbb{1}[y_k = i].$$

Такая матрица показывает, сколько объектов класса  $i$  были распознаны как объекты класса  $j$ . Эта информация позволяет понять не только, сколько ошибок делает алгоритм, но и то, насколько он точен. В случае бинарной классификации метка класса у принимает значение 0 (положительный класс) или 1 (отрицательный). Вводятся четыре величины:

- истинно положительные объекты ( $TP$  – *true positive*), которые были классифицированы как положительные и действительно являются положительными (принадлежащими к данному классу);

- истинно отрицательные объекты ( $TN$  – *true negative*), которые были классифицированы как отрицательные и действительно отрицательные (принадлежащими к данному классу);

- ложноположительные объекты ( $FP$  – *false positive*), которые были классифицированы как положительные, но фактически отрицательные;

- ложноотрицательные объекты ( $FN$  – *false negative*), которые были классифицированы как отрицательные, но фактически положительные.

Величины соответствуют элементам матрицы ошибок:

$$TP = \sum_{i=0}^n [a(x_i) = +1][y_i = +1], \quad (6)$$

$$TN = \sum_{i=0}^n [a(x_i) = -1][y_i = -1], \quad (7)$$

$$FP = \sum_{i=0}^n [a(x_i) = +1][y_i = -1], \quad (8)$$

$$FN = \sum_{i=0}^n [a(x_i) = -1][y_i = +1]. \quad (9)$$

Общий вид матрицы ошибок представлен в табл. 1.

Таблица 1. Матрица ошибок

Data		Экспертная оценка	
		Положительная	Отрицательная
Оценка классификатора	Положительная	$TP$	$FN$
	Отрицательная	$FP$	$TN$

Составим аналогичную матрицу ошибок по классу благонадежных организаций по алгоритму C5 за 2014 и 2015 гг. (табл. 2, 3).

Таблица 2. Матрица ошибок 2014

2014	Экспертная оценка	
Оценка классификатора	221	154
	18	501

Таблица 3. Матрица ошибок 2015

2015	Экспертная оценка	
Оценка классификатора	222	132
	44	416

Имея такую матрицу, точность для каждого класса *Precision* рассчитывается отдельно по формуле

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (10)$$

соответственно, точность для класса – отношение количества правильно отнесенных объектов по классу ко всем объектам класса в выборке [6].

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ

На завершающем этапе исследования было реализовано построение моделей деревьев решений с использованием программного продукта IBM SPSS Modeler [5]. Для построения деревьев решений существуют разные алгоритмы, в том числе C5, CHAID, C&R и QUEST. Эти ал-

горитмы реализуются рекурсивно, подгруппы разбиваются на все меньшие и меньшие блоки до тех пор, пока дерево не будет завершено. В результате отбора лучших моделей для анализируемого набора данных установлено, что самая высокая общая точность классификации на использованных данных достигнута с использованием алгоритма C5 и составила 81 %. Общая точность классификации при применении алгоритма CHAID – 68 %, алгоритма C&R – 71 %, алгоритма QUEST – 66 %.

После построения деревьев решений с использованием разных алгоритмов, важно оценить полученные результаты. Для этого можно использовать такие способы, как:

- 1) сегментация (позволяет идентифицировать тех, кто входит в определенную группу, а также вероятности попадания конкретного объекта в группу);

- 2) предсказание (позволяет сформировать правила и использовать их для предсказания будущих событий);

- 3) сокращение данных и экранирование переменных (позволяет выбрать полезное подмножество предикторов из большого набора переменных для использования при построении формальной параметрической модели);

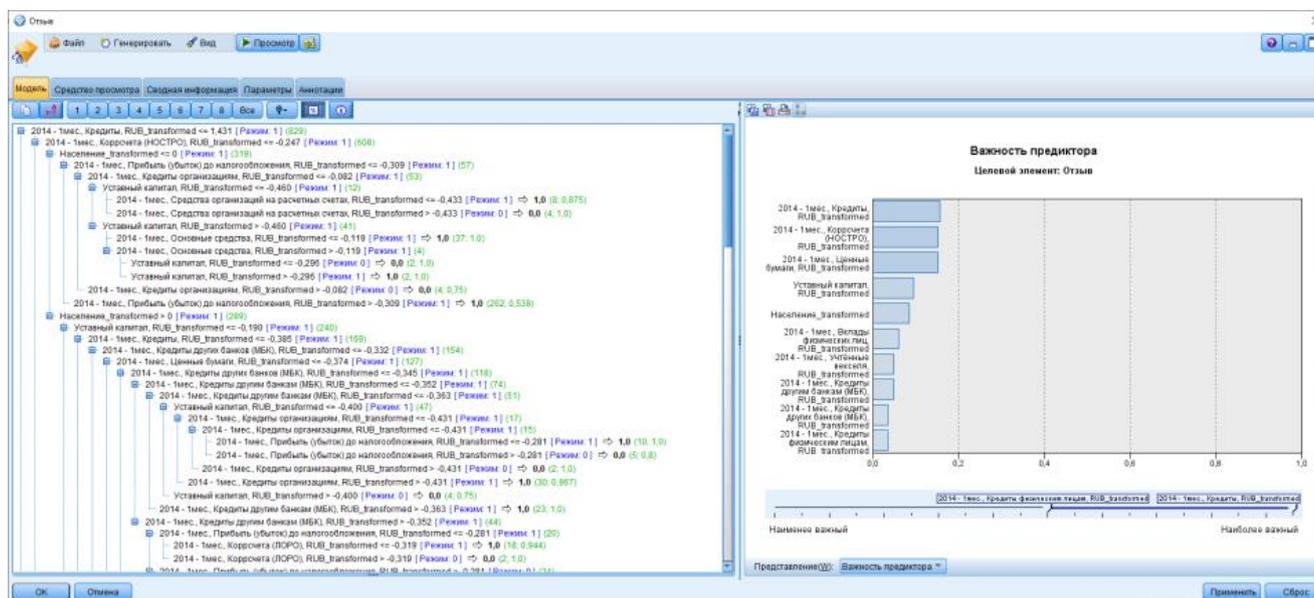
- 4) идентификация взаимодействия (позволяет установить взаимосвязи, которые принадлежат определенной подгруппе, и указать их в формальной параметрической модели).

Рассмотрим отдельные результаты применения алгоритмов деревьев решений. Согласно

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ КРЕДИТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

алгоритму C5 наиболее важными показателями финансовой деятельности, с точки зрения классификации кредитных организаций на благона-

дежные и высоко-рисковые, являются кредиты, корсчета (НОСТРО) и ценные бумаги (правая часть на рис. 5).



**Рис. 5.** Результаты классификации кредитных организаций с использованием алгоритма C5 деревьев решений

На рис. 5 (левая часть) представлен набор правил для алгоритма C5. Наборы правил получаются из дерева решений и в некотором смысле представляют собой упрощенную или очищенную версию информации, найденную деревом решений.

Проанализировав визуальную структуру деревьев решений, построенных с использованием разных алгоритмов, отметим, что дерево решений C5 обладает самой сложной структурой. Количество уровней в дереве составляет 16 ед.

Для сравнения, в дереве решений CHAID – 5 уровней, в дереве решений C&R – 5 уровней, в дереве решений QUEST – 4 уровня.

Ниже приведена сравнительная табл. 4 точностей классификации (*Accuracy*) нейронной сети и рассмотренных методов деревьев решений, а также точностей для классов благонадежных и неблагонадежных организаций (*Precision*) на данных стандартной финансовой отчетности № 101 за 2014 и 2015 гг.

**Таблица 4.** Сравнительная таблица значений точности классификации

Метод	Точность, все организации 2014	Точность, все организации 2015	Точность, благонадежные 2014	Точность, благонадежные 2015	Точность, ненадежные 2014	Точность, ненадежные 2015
НС (исходная выборка)	70 %	71 %	63 %	65 %	77 %	77 %
НС (усеченная выборка – 12 ГК)	63 %	66 %	63 %	66 %	63 %	65 %
Алгоритм C5	81 %	78 %	92 %	83 %	76 %	76 %
Алгоритм CHAID	68 %	68 %	62 %	61 %	74 %	76 %
Алгоритм C&R	70 %	71 %	62 %	64 %	76 %	78 %
Алгоритм QUEST	66 %	65 %	64 %	66 %	67 %	64 %

## АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В заключение можно сделать вывод, что максимальную общую точность классификации рассматриваемых объектов показал алгоритм C5 деревьев решений. Далее приведена табл. 5 наиболее значимых показателей, согласно мо-

дели нейронной сети и разновидностям построенных деревьев решений. В данном исследовании наиболее информативными показателями при проведении классификаций кредитных организаций на благонадежные и высокорисковые являются «Корсчета (НОСТРО)», «Уставный капитал», «Ценные бумаги» и др.

**Таблица 5.** Наиболее информативные показатели НС и деревьев решений

Нейронная сеть	Алгоритм C5	Алгоритм CHAID	Алгоритм C&R	Алгоритм QUEST
Уставный капитал	Кредиты	Корсчета (НОСТРО)	Корсчета (НОСТРО)	Корсчета (НОСТРО)
Корсчета (НОСТРО)	Корсчета (НОСТРО)	Уставный капитал	Прибыль (убыток) до налогообложения	Население региона
Средства организаций на р/с	Ценные бумаги	Население региона	Средства организаций на р/с	Капитал
Ценные бумаги	Уставный капитал		Уставный капитал	
Вклады физических лиц	Население региона		Население региона	

Итак, в настоящей работе рассмотрено применение искусственных нейронных сетей и методов деревьев решений в задаче классификации кредитных организаций как объектов экономической безопасности. Представлены результаты анализа данных о деятельности кредитных организаций с использованием разных методов деревьев решений: C5, CHAID, C&R и QUEST, а также нейронных сетей. Наивысшая общая точность классификации анализируемых объектов была достигнута с помощью алгоритма деревьев решений C5 и составила 81 %. На основании результатов данного алгоритма сгенерирован набор правил для определения принадлежности банка к определенному классу. Согласно методам деревьев решений и нейронным сетям были отобраны наиболее информативные показатели деятельности кредитных организаций с точки зрения их разбиения на два класса: благонадежные и высокорисковые.

При внедрении в структуру Единой информационной системы Росфинмониторинга рассмотренных выше методов деревьев решений и искусственных нейронных сетей аналитикам службы станет возможным осуществлять оперативную автоматизированную классификацию кредитных организаций с целью установления факта их вовлеченности в противоправную дея-

тельность по легализации денежных средств, полученных преступным путем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Паклин Н.Б., Орешков В.И.* Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. учеб. пособие. 2-е изд. СПб.: Питер, 2013. С. 428–472. ISBN 978-5-459-00717-6.
2. *Левитин А.В.* Алгоритмы: введение в разработку и анализ. М.: Вильямс, 2006. С. 409–417. 576 с. ISBN 978-5-8459-0987-9.
3. *Иванов В.В., Акишина Е.П., Приказчикова А.С.* Применение нейронных сетей и метода главных компонент для идентификации кредитных организаций, потенциально вовлеченных в процесс по легализации преступных доходов // Известия Исык-Кульского форума бухгалтеров и аудиторов стран Центральной Азии. 2022 № 2(37). С. 294–296.
4. Электронный учебник StatSoft. [Электронный ресурс]. URL: [Statisticahttp://statsoft.ru](http://statsoft.ru) (дата обращения 10.12.2022).
5. *Haykin.* Simon Neural networks and learning machines / Simon Haykin. 3rd ed. p. cm. Rev. ed of: Neural networks. 2nd ed., 1999.
6. *Гладилин П.Е., Боченина К.О.* Технологии машинного обучения. СПб: Университет ИТМО, 2020. 75 с.
7. IBM SPSS Modeler. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ibm.com/products/spss-modeler> (дата обращения 10.12.2022).

## THE COMPARATIVE ANALYSIS OF DECISION TREES AND NEURAL NETWORKS METHODS IN THE CREDIT INSTITUTIONS CLASSIFICATION PROBLEM

E.P. Akishina<sup>1</sup>, V.V. Ivanov<sup>1,2</sup>, A.V. Kryanev<sup>2\*</sup>, A.S. Prikazchikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia

\*e-mail: AVKryanev@mephi.ru

Received January 12, 2023; revised January 12, 2023; accepted January 24, 2023

In recent years, decision trees and neural network have been widely used in computer vision problems such as object recognition, text classification, gesture recognition, spam detection, semantic segmentation and data clustering. The article discusses the decision tree and neural networks methods application in the problem of classifying credit institutions as economic security objects. The analysis results of data on credit institutions activities of using different methods of decision trees: C5, CHAID, C&R and QUEST, as well as neural networks are presented. The highest overall classification accuracy of the analyzed objects was achieved using the C5 decision tree algorithm and amounted to 81 %. The overall classification accuracy using the CHAID algorithm was 68 %, the C&R algorithm was 71 %, and the QUEST algorithm was 66 %. Based on the C5 algorithm results, a set of rules was generated to determine whether a bank belongs to a certain class. According to the methods of decision trees and neural networks, the most informative performance indicators of credit institutions were selected in terms of their division into two classes: trustworthy and high-risk.

*Keywords:* machine learning, decision trees, neural network, classification, credit institutions, money laundering.

### REFERENCES

1. Paklin N.B., Oreshkov V.I. *Biznes-analitika: ot dannyh k znaniyam. ucheb. posobie. 2-e izd.* [Business Analytics: From Data to Knowledge, textbook allowance. 2nd ed.]. St. Petersburg, Piter Publ., 2013. P. 428–472. ISBN 978-5-459-00717-6.
2. Levitin A.V. *Algoritmy: vvedenie v razrabotku i analiz.* [Algorithms. Introduction to development and analysis]. M.: Williams Publ., 2006. P. 409–417. ISBN 978-5-8459-0987-9.
3. Ivanov V.V., Akishina E.P., Prikazchikova A.S. *Primenenie nejronnyh setej i metoda glavnyh komponent dlya identifikacii kreditnyh organizacij, potencialno vovlechennyh v process po legalizacii prestupnyh dohodov* [Application of neural networks and the method of principal components to identify credit institutions potentially involved in the process of money laundering]. *Izvestiya Issyk-Kul'skogo foruma buhgalterov i auditorov stran Central'noj Azii*, 2022. № 2 (37). P. 294–296.
4. *Elektronnyj uchebnik StatSoft* [Electronic textbook StatSoft]. Available at: <http://statsoft.ru> (accessed 10.12.2022).
5. Haykin. *Simon Neural networks and learning machines.* Simon Haykin. 3rd ed. p. cm. Rev. ed of: *Neural networks.* 2nd ed., 1999.
6. Gladilin P.E., Bochenina K.O. *Tekhnologii mashinnogo obucheniya* [Machine learning technologies]. St. Petersburg: ITMO University Publ., 2020. 75 p.
7. IBM SPSS Modeler. Available at: <https://www.ibm.com/products/spss-modeler> (accessed 10.12.2022).

УДК 621.311.16:621.315.05:681.89

## ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ОСНОВЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ И РЕЗОНАТОРА

© 2022 В.О. Кислицын<sup>1\*</sup>, Г.Я. Карапетьян<sup>2</sup>, В.Ф. Катаев<sup>3\*\*</sup>, Б.М. Середин<sup>4</sup>, Н.В. Ермолаева<sup>3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ООО НТЦ «РУСЬ», Санкт-Петербург, 199178, Россия

<sup>2</sup>Южный федеральный университет, 344090, Россия

<sup>3</sup>Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ, Волгодонск,  
Ростовская обл., 347360, Россия

<sup>4</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Ростовская обл., 346428, Россия

\*e-mail: [kislitsyn@rfsaw.ru](mailto:kislitsyn@rfsaw.ru)

\*\*e-mail: [kataev.v.f.@gmail.com](mailto:kataev.v.f.@gmail.com)

\*\*\*e-mail: [ermolnv@mail.ru](mailto:ermolnv@mail.ru)

Поступила в редакцию: 17.01.2023

После доработки: 30.01.2021

Принята к публикации: 07.02.2023

Представлены результаты исследований датчика температуры на основе линии задержки и резонатора на поверхностных акустических волнах. Разработана методика расчета такого датчика при условии, что отражательный встречно-штыревой преобразователь линии задержки содержит расщепленные электроды и к нему подсоединен резонатор. Произведен расчет датчика на частоту 433 МГц. Показано, что влияние внешних емкостей на резонансную частоту при подсоединении к приемо-передающему встречно-штыревому преобразователю существенно меньше, чем при подсоединении их непосредственно к резонатору. В этом случае ПАВ-резонатор имеет с антенной только акустическую связь, и влияние антенны и окружающих предметов на резонансную частоту будет отсутствовать. Отмечено, что использование линий задержки на поверхностных акустических волнах ослабляет влияние внешних емкостей на резонансный пик параметра  $S_{11}$  по сравнению с влиянием их на резонансный пик ПАВ-резонатора, что повышает точность измерения температуры. Предлагаемый в настоящей работе датчик температуры рекомендуется применять для автоматизации процессов контроля за температурными режимами эксплуатирующегося высоковольтного электрооборудования трансформаторных и распределительных подстанций.

*Ключевые слова:* поверхностные акустические волны (ПАВ), встречно-штыревой преобразователь (ВШП), линия задержки на ПАВ, ПАВ-резонатор, параметр  $S_{11}$ .

**DOI:** <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.241>

### ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированный температурный контроль (мониторинг) эксплуатирующегося высоковольтного электрооборудования трансформаторных и распределительных подстанций является важной составной частью единой системы обеспечения энергоснабжения и безопасности эксплуатации. От степени автоматизации процессов контроля за температурными режимами эксплуатации судового электрооборудования зависит как скорость реакции системы обеспечения энергоснабжения на возникновение нештатной ситуации (нарушение контакта, старение изоляции, несимметричность нагрузки, фазные замыкания и прочие причины), так и вероятность их возникновения в целом, что в свою очередь определяет надежность системы

энергоснабжения и сохранность эксплуатационного ресурса электрооборудования.

В настоящее время одним из эффективных способов измерения температуры является пассивный беспроводный датчик на основе резонатора на поверхностных акустических волнах [1]. В таком датчике с помощью считывателя измеряется параметр  $S_{11}$  приемо-передающей антенны считывателя, на который влияет отраженный от антенны датчика сигнал. При этом температура определяется по пику резонатора на поверхностных акустических волнах (ПАВ), частота которого зависит от температуры. Температуру определяют, зная частоту резонансного пика при известной температуре и сдвиг частоты при температуре, которую необходимо измерить. Но в таком методе измерения температуры имеется недостаток. Дело в том, что ча-

## ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ОСНОВЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ И РЕЗОНАТОРА

стотное положение резонансного пика на частотной зависимости параметра  $S_{11}$  зависит не только от температуры, но и от параметров антенны, подключенной к резонатору, и от взаимного расположения антенны и различных металлических предметов, находящихся около нее. Такое влияние сводится к подсоединению к ПАВ-резонатору дополнительных емкостей, что и приводит к сдвигу его резонансной частоты. Это влияние небольшое, но если учесть, что сдвиг частоты резонанса при изменении температуры может быть сравним с частотным сдвигом, обусловленным влиянием антенны и окружающих предметов, то это может привести к существенной ошибке при измерении температуры. Не случайно известные датчики температуры на основе ПАВ-резонатора имеют точность измерения  $\pm 2^\circ$ .

### ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Чтобы устранить указанный недостаток и тем самым повысить точность измерения температуры, необходимо устранить электрическую связь между ПАВ-резонатором и антенной. Для этого можно использовать ПАВ-линию задержки (ЛЗ), содержащую приемо-передающий и отражательный встречно-

штыревые преобразователи (ВШП). В этом случае ПАВ-резонатор подсоединяется к отражательному ВШП, а приемо-передающий ВШП подсоединяется к антенне. Тогда ПАВ-резонатор имеет с антенной только акустическую связь, и влияние антенны и окружающих предметов на резонансную частоту будет отсутствовать.

В качестве ПАВ-резонатора будем использовать ПАВ-резонатор, описанный в работе [2]. Он представляет собой параллельно включенные попарно последовательно соединенные прореженные ВШП, при этом к резонатору подсоединена шунтирующая емкость, как показано на рис. 1. Если такой резонатор подсоединить к отражательному ВШП, то вне резонансной частоты он будет шунтирован емкостью резонатора, что приведет к резкому снижению коэффициента отражения ПАВ от него. В то же время на частоте вблизи резонанса собственная индуктивность скомпенсирует шунтирующую емкость, что приведет к резкому увеличению коэффициента отражения ПАВ от отражательного ВШП на частотах близких к резонансной. Это в свою очередь приведет к появлению пика на входном сопротивлении ЛЗ на ПАВ, а, следовательно, и появлению пика на частотной зависимости параметра  $S_{11}$  антенны.

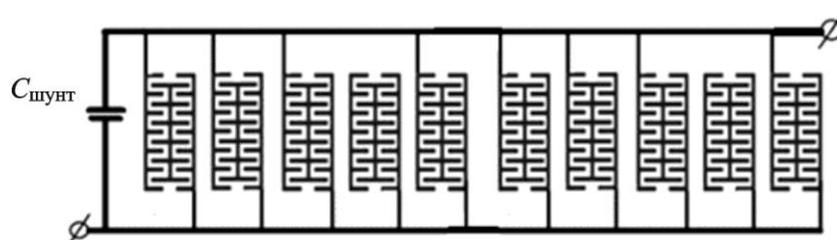


Рис. 1. Конструкция ПАВ резонатора

Конструкция датчика приведена на рис. 2. Для уменьшения потерь на двунаправленность в качестве приемо-передающего ВШП используется однонаправленный ВШП с внутренними отражателями [3], а в качестве отражательного

ВШП – ВШП с расщепленными электродами. Это сделано для того, чтобы коэффициент отражения ПАВ от ВШП в короткозамкнутом контуре был близок к нулю [4].

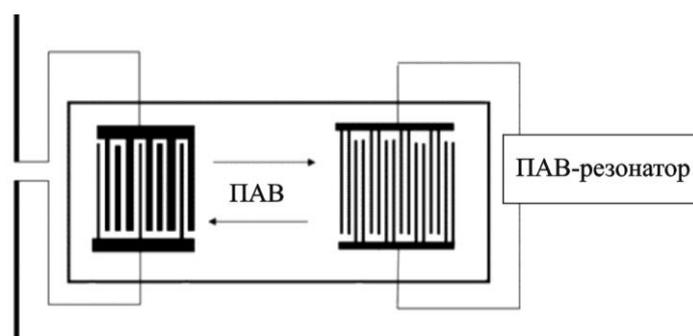


Рис. 2. Датчик температуры с ЛЗ и резонатором на ПАВ

РАСЧЕТ ПАВ-ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ  
ПАВ-РЕЗОНАТОРА И ЛЗ

Входная проводимость ЛЗ на ПАВ, представленной на рис. 2, определяется как [5]

$$Y_{\text{вх}} = \frac{\left\{ Y_{11} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{22} + Y_{\text{н}}} \right\}}{1 + Z_G \left( Y_{11} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{22} + Y_{\text{н}}} \right)}, \quad (1)$$

где  $Y_{11}$  – проводимость приемо-передающего ВШП;  $Y_{\text{н}} = 1/R_{\text{н}}$  – проводимость нагрузки;  $R_{\text{н}}$  – сопротивление нагрузки, подключаемое к отражательному ВШП;  $Z_G$  – сопротивление генератора.

$$Y_{11} = G_{a1} + j(B_{a1} + \omega C_{T1}),$$

$$Y_{12}^2 / (Y_{11} + Y_{22}) = G_{a1} \cdot K_{\text{отрВШП}} \cdot e^{-j\omega T},$$

$$T = 2l / V_{\text{SAW}},$$

где  $l$  – расстояние между ВШП;  $K_{\text{отрВШП}}$  – коэффициент отражения от отражательного ВШП:

$$K_{\text{отрВШП}} = \frac{-G_{a2}}{G_{a2} + j\omega(C_{T2} + B_{a2} + Y_{\text{н}})}.$$

Причем значения  $B_a$  и  $G_a$  определяются по формулам [4]:

$$G_{a1} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T1} \cdot N1 \cdot \left( \frac{\sin X1}{X1} \right)^2,$$

$$B_{a1} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T1} \cdot N1 \cdot \left( \frac{\sin 2X1 - 2X1}{2X1^2} \right),$$

$$X1 = \pi \cdot N1 \cdot \frac{f - f_0}{f_0}, \quad C_{T1} = W \cdot N1 \cdot Cs,$$

$$G_{a2} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T2} \cdot N2 \cdot \left( \frac{\sin X2}{X2} \right)^2,$$

$$B_{a2} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T2} \cdot N2 \cdot \left( \frac{\sin 2X2 - 2X2}{2X2^2} \right),$$

$$X2 = \pi \cdot N2 \cdot \frac{f - f_0}{f_0}, \quad C_{T2} = W \cdot N2 \cdot Cs,$$

где  $N1$  – число пар электродов (периодов) приемо-передающего ВШП;  $k$  – коэффициент электромеханической связи;  $Cs$  – емкость одновол-

новой секции ВШП на единицу апертуры ВШП;  $l$  – расстояние между ВШП;  $N2$  – число пар электродов (периодов) отражательного ВШП.

Апертуры обоих ВШП одинаковы.

Эти выражения получены при допущении, что от электродов ВШП ПАВ не отражаются. В этом случае при замыкании ВШП ( $R_L = 0$  или  $Y_{\text{н}} = \infty$ ) коэффициент отражения ПАВ от ВШП равен 0. Поэтому с помощью внешней нагрузки коэффициент отражения от ВШП можно менять в очень широких пределах, меняя проводимость нагрузки. Такая возможность появляется, если в ВШП использовать расщепленные электроды. В этом случае период следования электродов будет вдвое меньше длины ПАВ, и максимум отражения придется на частоту вдвое выше центральной частоты ВШП. Поэтому отражением ПАВ от такого ВШП в короткозамкнутом состоянии можно будет пренебречь.

В качестве нагрузки, как видно из рис. 2, используется ПАВ-резонатор, показанный на рис. 1.

Активная составляющая проводимости резонатора

$$Y_1 = \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot z_1}{(n_1 \cdot z_1)^2 + (n_1 \cdot z_2)^2}, \quad (2)$$

а реактивная составляющая проводимости резонатора равна:

$$Y_2 = \frac{-n_1 \cdot n_2 \cdot z_2}{(n_1 \cdot z_1)^2 + (n_1 \cdot z_2)^2} \times \\ \times 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{\text{шунт}}, \quad (3)$$

где  $n_1$  – число ВШП, соединенных последовательно,  $n_2$  – число последовательно соединенных  $n_1$  ВШП, соединенных параллельно. Как видно из рис. 1,  $n_1 = 2$ , а  $n_2 = 10$ ;  $z_1$  и  $z_2$  – активная и реактивная составляющие сопротивления одинаковых ВШП, из которых состоит резонатор.

$$z_1 = \frac{G_{a\text{ВШП}} + \frac{1}{R_{\text{об}}}}{\left( G_{a\text{ВШП}} + \frac{1}{R_{\text{об}}} \right)^2 + (B_{a\text{ВШП}} + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{T\text{ВШП}})^2} + R_1, \quad (4)$$

$$z_2 = \frac{-(B_{a\text{ВШП}} + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{T\text{ВШП}})}{\left( G_{a\text{ВШП}} + \frac{1}{R_{\text{об}}} \right)^2 + (B_{a\text{ВШП}} + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{T\text{ВШП}})^2}, \quad (5)$$

$$G_{a\text{ВШП}} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T2} \cdot N2 \cdot \left( \frac{\sin X}{X} \right)^2, \quad B_{a\text{ВШП}} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T\text{ВШП}} \cdot N2 \cdot \left( \frac{\sin 2X - 2X}{2X^2} \right),$$

$$X = \pi \cdot N_{\text{ВШП}} \cdot \frac{f - f_{\text{орез}}}{f_{\text{орез}}}, \quad C_{T\text{ВШП}} = W_{\text{ВШП}} \cdot N2 \cdot Cs,$$

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ  
НА ОСНОВЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ И РЕЗОНАТОРА

где  $N_{\text{ВШП}}$  – число пар электродов в ВШП;  $W_{\text{ВШП}}$  – апертюра ВШП в резонаторе;  $f_{0\text{рез}}$  – центральная частота ВШП в резонаторе;  $R_{0б}$  – сопротивление, обусловленное частичным преобразованием ПАВ в объемные волны;  $R_1$  – сопротивление в пленке, обусловленное омическими потерями в металлической пленке, из которой сделаны ВШП [1].

Как показали расчеты, лучшие результаты по добротности резонаторов получаются, если ВШП сделать прореженными таким образом, что длина ВШП соответствовала бы полному числу пар электродов, а реальное число электродов было бы в 4 раза меньше. Тогда при  $N_{\text{ВШП}} = 600$  число пар электродов в выражениях для  $G_a$ ,  $B_a$  и  $C_{\text{ТВШП}}$  следует положить равным 150.

Тогда модуль входного сопротивления ЛЗ на ПАВ с подсоединенным к отражательному ВШП ПАВ-резонатору равен:

$$|Y_{\text{вх}}| = \frac{\sqrt{(ReY_{11} - A)^2 + (ImY_{11} - B)^2}}{\sqrt{[1 + Rg(Y_{11} - A)]^2 + [Rg(ImY_{11} - B)]^2}}, \quad (6)$$

где

$$A = G_{a1} \cdot [ReK_{ref} \cos(X_3) + ImK_{ref} \sin(X_3)], \quad (7)$$

$$B = G_{a1} \cdot [-ReK_{ref} \sin(X_3) + ImK_{ref} \cos(X_3)], \quad (8)$$

$X_3 = 2 \cdot \pi \cdot N_3 \cdot \frac{f - f_0}{f_0}$ ;  $N_3$  – удвоенное расстояние между центрами ВШП;  $ReK_{ref}$  – действительная часть коэффициента отражения ПАВ от отражательного ВШП;  $ImK_{ref}$  – мнимая часть коэффициента отражения ПАВ от отражательного ВШП;  $Rg$  – сопротивление генератора ( $Rg = 50 \text{ Ом}$ ).

В этом случае параметр  $S_{11}$ , определяемый как

$$S_{11} = \begin{cases} \frac{Z_{\text{вх}}}{Rg}, & Z_{in} > Rg \\ \frac{Rg}{Z_{\text{вх}}}, & Z_{in} < Rg \end{cases}, \quad Z_{\text{вх}} = 1/|Y_{\text{вх}}|,$$

зависит не только от коэффициента отражения, но и от нагрузки, подсоединяемой к приемопередающему ВШП, т.е. от импеданса резонатора. Полагая далее  $N_1 = N_2 = 17$ ,  $W = 600 \text{ мкм}$ ,  $N_{\text{ВШП}} = 600$ ,  $W_{\text{ВШП}} = 27 \text{ мкм}$ ,  $C_{\text{шунт}} = 19.8 \text{ пФ}$ ,  $C_s = 450 \text{ пФ/м}$ ,  $k^2 = 0.058$ , что соответствует расположению и ЛЗ, и резонатора на  $YX/128^\circ$  срезе ниобата лития, рассчитаем частотную зависимость модуля входного сопротивления ( $Z_{\text{вх}}$ ) и параметра  $S_{11}$ , а также модуля импеданса резонатора ( $Z_{\text{рез}}$ ) при расстоянии между ВШП в 200 длин ПАВ на центральной частоте и цен-

тральной частоте ВШП ЛЗ и ВШП-резонатора  $f_0 = f_{0\text{рез}} = 433 \text{ МГц}$  по формулам (1)–(8).

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов приведены на рис. 3–6. Из рис. 3 видно, что ПАВ-резонатор хорошо шунтирует ВШП на частотах ниже 433 МГц, так как его импеданс оказывается значительно ниже 50 Ом (около 6 Ом), но на частотах выше 433 МГц импеданс ПАВ-резонатора становится несколько больше (около 20 Ом) и потому слабее шунтирует отражательный ВШП. Это накладывает ограничения на расстояние между ВШП, поскольку изрезанность входного сопротивления или параметра  $S_{11}$ , обусловленная отражением ПАВ от отражательного ВШП, накладывается на резонансный пик и может его существенно уменьшить и расширить.

Из рис. 5 видно, что если добротность пика (отношение центральной частоты к ширине полосы пропускания по уровню 3 дБ) была около 3300, то при изменении расстояния до 100 длин ПАВ добротность становится меньше 1000. Расчеты показывают, что при расстоянии между ВШП 200–250 длин ПАВ на центральной частоте добротность пика не меняется, хотя происходит уменьшение резонансной частоты на 0,04 МГц при росте расстояния между ВШП от 200 до 250 длин ПАВ. Так как при росте температуры ниобат лития будет расширяться, то расстояние между ВШП будет увеличиваться, что приведет к незначительному уменьшению частоты резонансного пика. Но если ПАВ-резонатор конструктивно выполнен на той же подложке, что и ЛЗ, то при росте температуры резонансная частота также будет понижаться [6, 7]. Это означает, что зависимость частоты резонансного пика ПАВ-резонатора от температуры не будет ослабляться из-за зависимости этой частоты от расстояния между ВШП ЛЗ [8].

Как показывают произведенные расчеты, изменение шунтирующей емкости в ПАВ-резонаторе (см. рис. 1) на величину, равную 10 % от емкости приемопередающего ВШП, приводит к изменению частоты ПАВ-резонатора на 0,0012 %. В то же время изменение емкости приемопередающего ВШП на ту же величину путем подсоединения к нему дополнительной емкости не приводит к изменению резонансного пика на частотной зависимости параметра  $S_{11}$  на 0,0008 %, хотя это изменение по отношению к шунтирующей емкости составляет 2.6 %.

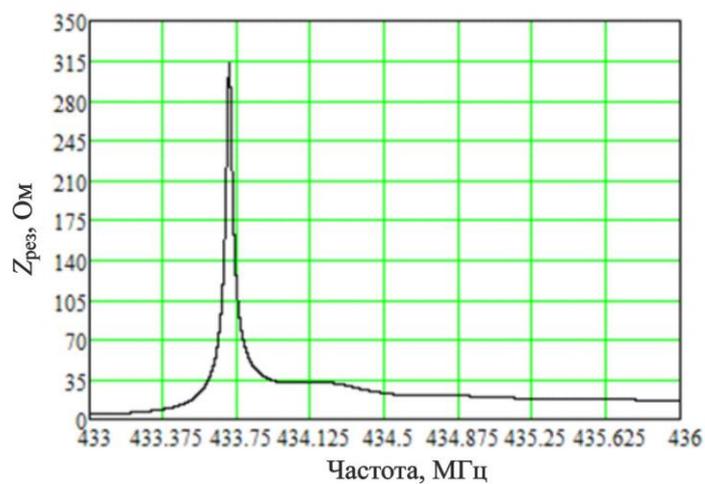


Рис. 3. Частотная зависимость импеданса ПАВ-резонатора

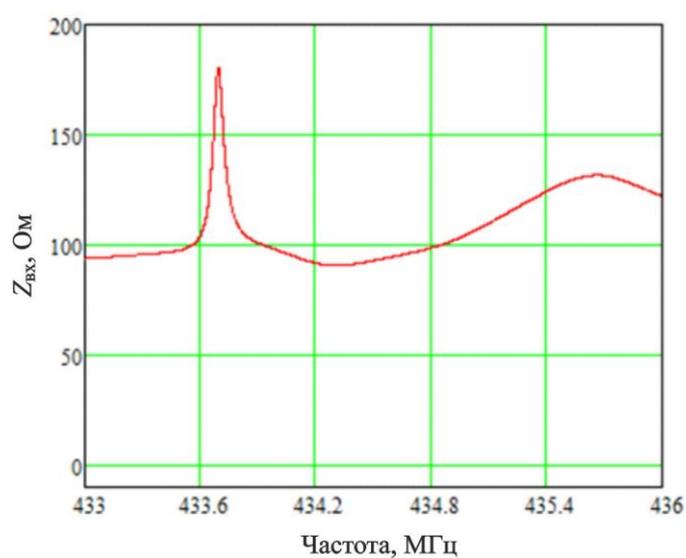


Рис. 4. Частотная зависимость входного сопротивления ЛЗ на ПАВ, в которой к отражательному ВШП подсоединен ПАВ-резонатор при расстоянии между ВШП, равном 250 длин ПАВ на центральной частоте

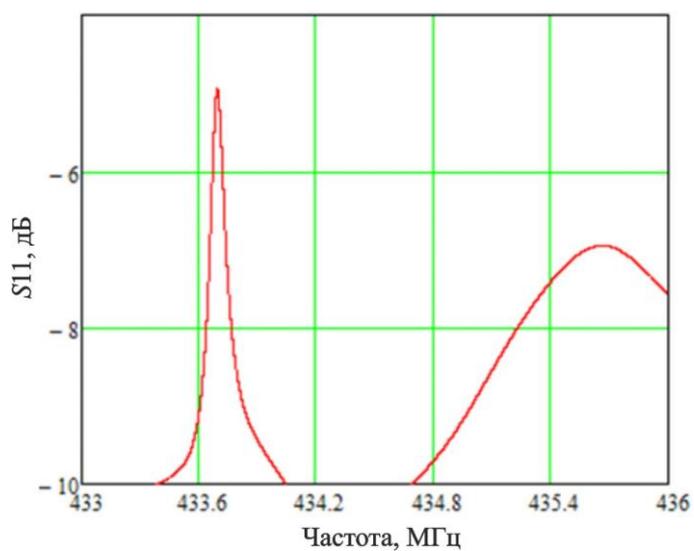
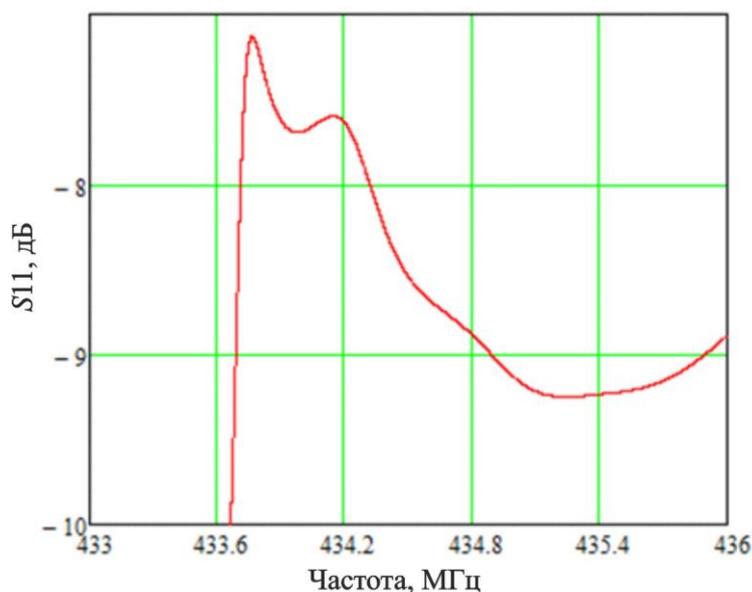


Рис. 5. Частотная зависимость параметра  $S_{11}$  ЛЗ на ПАВ, в которой к отражательному ВШП подсоединен ПАВ-резонатор при расстоянии между ВШП, равном 200 длин ПАВ на центральной частоте

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ  
НА ОСНОВЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ И РЕЗОНАТОРА



**Рис. 6.** Частотная зависимость параметра  $S_{11}$  ЛЗ на ПАВ, в которой к отражательному ВШП подсоединен ПАВ-резонатор при расстоянии между ВШП, равном 100 длин ПАВ на центральной частоте

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование ЛЗ на ПАВ ослабляет влияние внешних емкостей на резонансный пик параметра  $S_{11}$  по сравнению с влиянием их на резонансный пик ПАВ-резонатора, что повышает точность измерения температуры. Это подтверждается тем, что при подсоединении емкости, равной 10 % от емкости приемо-передающего ВШП ЛЗ на ПАВ к ПАВ-резонатору, приводит к изменению резонансной частоты на 0.0012 %, а подсоединение этой же емкости к приемо-передающему ВШП ЛЗ на ПАВ приводит к изменению резонансного пика параметра  $S_{11}$  на 0.0008 %. При этом внешняя емкость составляет 2.5 от шунтирующей емкости ПАВ-резонатора и 10 % от емкости приемо-передающего ВШП ЛЗ на ПАВ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин А.В., Калинин В.А., Кислицын В.О. Патент на промышленный образец № 115729. Дата публикации: 05.08.2019. Бюл. № 8.
2. Karapetyan G.Ya., Kaydashev V.E., Kuterov M.E., Minasyan T.A., Kalinin V.A., Kislitsyn V.O. and Kaydashev E.M. Tunable high-Q SAW resonator loaded on a

changing capacitance // Journal of advanced dielectrics. 2020. Vol. 10. Nos. 1 & 2. 2060009 (6 pages).

3. Карпетьян Г.Я., Багдасарян С.А., Багдасарян Н.А. Однонаправленный преобразователь поверхностных акустических волн. Патент на изобретение РФ 2195069, МПК H03H 9/145 (2000.01), 2002. Бюл. № 35.

4. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1990. 416 с.

5. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1983. 136 с.

6. Устройство считывания изображений на поверхности акустических волн с помощью встречно-штыревых преобразователей на подложке из сульфида кадмия / Г.Я. Карпетьян, В.Ф. Катаев, В.Г. Днепровский, Н.В. Ермолаева // Вест. Нац. исслед. ядер. ун-та «МИФИ». 2016. Т. 5. № 2. С. 110–115.

7. Датчик тока с магниточувствительной пленкой. В.О. Кислицын, В.А. Калинин, Г.Я. Карпетьян, В.Ф. Катаев, Н.В. Ермолаева // Вест. Нац. исслед. ядер. ун-та «МИФИ». 2021. Т. 10. № 1. С. 63–69.

8. Чувствительные элементы пассивных беспроводных датчиков на поверхностных акустических волнах для измерения тока в трехфазных цепях / В.О. Кислицын, В.А. Калинин, Г.Я. Карпетьян, В.Ф. Катаев, Н.В. Ермолаева // Вест. Нац. исслед. ядер. ун-та «МИФИ». 2020. Т. 9. № 2. С. 177–183.

## **SURFACE ACOUSTIC WAVE TEMPERATURE SENSOR BASED ON DELAY LINE AND RESONATOR**

**V.O. Kislitsyn<sup>a,\*</sup>, G.Ya. Karapetyan<sup>b</sup>, V.F. Kataev<sup>c,\*\*</sup>, B.M. Seredin<sup>d</sup>, N.V. Ermolaeva<sup>c,\*\*\*</sup>**

<sup>a</sup> *Scientific–Technical Center Rus, St. Petersburg, 199178 Russia*

<sup>b</sup> *Southern Federal University, 344090, Russia*

<sup>c</sup> *Volgodonsk Engineering–Technical Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Volgodonsk, Rostov region, 347360 Russia*

<sup>d</sup> *Platov South- Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russia*

\**e-mail: kislitsyn@rfsaw.ru*

\*\**e-mail: kataev.v.f.@gmail.com*

\*\*\**e-mail: ermolv@mail.ru*

Received January 17, 2023; revised January 30, 2023; accepted February 7, 2023

The results of studies of a temperature sensor based on a delay line and a resonator based on surface acoustic waves are presented. A method for calculating such a sensor is developed under the condition that the reflective interdigital delay line converter contains split electrodes and a resonator is connected to it. The sensor was calculated for a frequency of 433 MHz. It is shown that the effect of external capacitances on the resonant frequency when connected to a receiving-transmitting interdigital transducer is significantly less than when they are connected directly to the resonator. In this case, the SAW resonator has only an acoustic connection with the antenna, and the influence of the antenna and surrounding objects on the resonant frequency will be absent. It is noted that the use of delay lines on surface acoustic waves weakens the effect of external capacitances on the resonant peak of parameter  $S_{11}$  compared to their effect on the resonant peak of the SAW resonator, which increases the accuracy of temperature measurement. The temperature sensor proposed in this paper is recommended to be used to automate the processes of monitoring the temperature conditions of the operating high-voltage electrical equipment of transformer and distribution substations.

*Keywords:* surface acoustic waves (surfactants), counter-pin converter (VSHP), delay line on surfactants, surfactant resonator, parameter  $S_{11}$ .

### REFERENCES

1. Sorokin A.V., Kalinin V.A., Kislitsyn V.O. Patent na promyshlennyy obrazec № 115729 [Patent for industrial design No.115729]. 2019. Bull. No. 8.
2. Karapetyan G.Ya., Kaydashev V.E., Kutepov M.E., Minasyan T.A., Kalinin V.A., Kislitsyn V.O and Kaidashev E.M. Tunable high-Q SAW resonator loaded on a changing capacitance. *Journal of advanced dielectrics*, 2020. Vol. 10. Nos. 1 & 2 (2020) 2060009 (6 pages).
3. Karapetjan G.Ja., Bagdasarjan S.A., Bagdasarjan N.A. Odonapravlenyj preobrazovatel' poverhnostnyh akusticheskikh voln [Unidirectional transducer of surface acoustic waves]. Patent RF. No. 2195069. IPC H03H 9/145 (2000.01). 2002. Bull. No. 35.
4. Morgan D. Ustrojstva obrabotki signalov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah [Devices for processing signals on surface acoustic waves]. M.: Radio i svyaz' Publ. 1990. 416 p.
5. Dvornikov A.A., Ogurcov V.I., Utkin G.M. Stabil'nye generatory s fil'trami na poverhnostnyh akusticheskikh volnah [Stable generators with filters on surface acoustic waves]. M.: Radio i svyaz' Publ. M.: Radio i svyaz'. 1983. 136 p.
6. Karapet'yan G.YA., Kataev V.F., Dneprovskij V.G., Ermolaeva N.V. Ustrojstvo schityvaniya izobrazhenij na poverhnostnyh akusticheskikh volnah s pomoshch'yu veernyh vstrechno-shtyrevykh preobrazovatelej na podlozhke iz sul'fida kadmiya [Device for reading images on surface acoustic waves using fan-shaped interdigital transducers on a cadmium sulfide substrate]. *Vestnik NIYaU MIFI*. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 110–115 (in Russian).
7. Kislicyn V.O., Kalinin V.A., Karapet'yan G.YA., Kataev V.F. Ermolaeva N.V. Datchik toka s magnitochuvstvitel'noj plenkoj [Current sensor with magnetic film]. *Vestnik NIYaU MIFI*. 2021. Vol. 10. No. 1. P. 63–69 (in Russian).
8. Kislicin V.O., Kalinin V.A., Karapetyan G.Ya., Kataev V.F., Ermolayeva N.V. Chuvstvitel'nye elementy passivnyh besprovodnyh datchikov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah dlya izmereniya toka v trekhfaznyh cepyah [Sensitive elements of passive wireless sensors on surface acoustic waves for measuring current in three-phase circuits]. *Vestnik NIYaU MIFI*. 2020. Vol. 9. No. 2. P. 177–183 (in Russian).

---

Дата выхода в свет 09.10.2023. г. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Усл. печ. л. 9,0. Уч.-изд. л. 9,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 92. Цена свободная

---

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».  
Типография НИЯУ МИФИ. 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31.