

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Железняк А. А.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

5

Никитин М. С., Тычков А. Ю.

СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ГОРОДСКОГО
УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ IOT-ПЛАТФОРМЫ

13

Драч В. Е., Кондратов Д. А., Шмелькова А. А.

ИНФРАКРАСНЫЕ ДАТЧИКИ КРЕНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

21

Конкина М. С.

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЧАСТОТНЫХ
ИНТЕГРИРУЮЩИХ РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОСТОВЫХ ТЕНЗОСХЕМ

31

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Захаров А. В., Либкинд И. В., Шахмейстер Л. Е.

ПРИМЕНЕНИЕ ВРЕМЯИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
В ДАТЧИКАХ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

38

Чащин И. В., Ширямов О. А., Колосова А. В., Протасова А. В.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СООТВЕТСТВИЯ ПРОГРАММНЫХ
СРЕДСТВ ИСПЫТАНИЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ.
СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

47

Пономарев В. Н., Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Здобнов С. А.
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО
ДАТЧИКА ИЗБЫТОЧНЫХ ДАВЛЕНИЙ

56

*Голубков П. Е., Печерская Е. А., Козлов Г. В.,
Александров В. С., Мельников О. А., Зинченко Т. О.*
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО
СИГНАЛА НА ПОГРЕШНОСТЬ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ
СВОЙСТВ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

64

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Рыблова Е. А., Волков В. С.
ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ВИДЕ КРУГЛОЙ МЕМБРАНЫ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И СНИЖЕНИЯ
ПОГРЕШНОСТИ ЛИНЕЙНОСТИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

73

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Харитонов В. В., Шешегов П. М., Зинкин В. Н.
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ
ЗАЩИТЫ ГОЛОВЫ В АРМЕЙСКОЙ АВИАЦИИ
И ПУТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

80

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Баянбай Н., Ожикенов К. А., Шерстнев В. В.,
Безбородова О. Е., Бодин О. Н.*
ПОДСИСТЕМА СВЯЗИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ
В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

92

Шерстнев В. В.
КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА И УПРАВЛЕНИЕ
КОНФИГУРАЦИЕЙ МАНИПУЛЯТОРА, УСТАНОВЛЕННОГО
НА БЕСПИЛОТНОМ ВОЗДУШНОМ СУДНЕ

100

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 1, 2022

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Zhelezniak A.A.

IMPROVING THE QUALITY OF DYNAMIC
PROCESS CONTROL IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

5

Nikitin M.S., Tychkov A.Yu.

SMART CITY STREET LIGHTING SYSTEM
BASED ON IOT PLATFORM

13

Drach V.E., Kondratov D.A., Shmelkova A.A.

IR ROLL SENSOR FOR DETERMINATION OF
AN ANGULAR ORIENTATION OF THE AIRCRAFT

21

Konkina M.S.

ERROR COMPENSATION OF FREQUENCY INTEGRATING
UNFOLDING CONVERTERS BASED ON SEMICONDUCTOR
BRIDGE STRAIN CIRCUITS

31

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Zakharov A.V., Libkind I.V., Shakhmeyster L.E.

APPLICATION OF TIME-PULSE CONVERSION IN TEMPERATURE
SENSORS WITH SEMICONDUCTOR SENSITIVE ELEMENT

38

Chashchin I.V., Shiryamov O.A., Kolosova A.V., Protasova A.V.

CONFIRMATION OF THE COMPLIANCE OF THE SOFTWARE
FOR TESTING MILITARY EQUIPMENT WITH METROLOGICAL
REQUIREMENTS. STATE, DEVELOPMENT PROSPECTS

47

Ponomarev V.N., Bastrygin K. I., Trofimov A.A., Zdobnov S.A.

SIMULATION MODELING OF A STRAIN GAUGE
OVERPRESSURE SENSOR

56

*Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Kozlov G.V.,
Alexandrov V.S., Melnikov O.A., Zinchenko T.O.*
STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MEASURING SIGNAL
FREQUENCY ON THE INDIRECT MEASUREMENT
ERROR OF OXIDE COATINGS PROPERTIES

64

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

Ryblova E.A., Volkov V.S.
OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF A SEMICONDUCTOR
SENSING ELEMENT IN THE FORM OF A ROUND MEMBRANE
IN ORDER TO INCREASE THE SENSITIVITY AND REDUCE
THE LINEARITY ERROR OF THE OUTPUT SIGNAL

73

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Kharitonov V.V., Sheshegov P.M., Zinkin V.N.
EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF PERSONAL
HEAD PROTECTION EQUIPMENT IN ARMY AVIATION
AND WAYS TO IMPROVE THEM

80

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

*Bayanbay N., Ozhikenov K.A., Sherstnev V.V.,
Bezborodova O.E., Bodin O.N.*
COMMUNICATION SUBSYSTEM OF CONTROL SYSTEMS
OF UNMANNED AIRCRAFT UNDER EMERGENCY CONDITIONS

92

Sherstnev V.V.
KINEMATIC SCHEME AND MANIPULATOR CONFIGURATION
CONTROL, INSTALLED ON AN UNMANNED AIRCRAFT

100

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.5

doi:10.21685/2307-5538-2022-1-1

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А. А. Железняк

Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия
zheleznyak13@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение качества управления динамическими процессами в электро-энергетических системах предполагает широкое внедрение методов оптимального управления, реализуемых с помощью средств вычислительной и микропроцессорной техники. *Материалы и методы.* Эффективность оптимального управления существенным образом зависит от класса математической модели, описывающей процессы в электроэнергетических системах. *Результаты.* Использование моделей энергосистемы высокого класса точности для выбора законов управления не позволяет в реальном масштабе времени осуществлять коррекцию режимов системы в связи с большим объемом вычислений параметров оптимального регулятора и недостаточной схожимостью вычислительных процессов. *Выводы.* Поэтому требуется рациональное упрощение математических моделей в электроэнергетических системах, применяемых для выбора закона управления, которые позволили бы избежать этих трудностей и вместе с тем обеспечить точность решения по выбору оптимальных регуляторов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, повышение качества, оптимальное управление, сингулярные возмущения, моделирование

Для цитирования: Железняк А. А. Повышение качества управления динамическими процессами в электро-энергетических системах // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 5–12. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-1

IMPROVING THE QUALITY OF DYNAMIC PROCESS CONTROL IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

A.A. Zhelezniak

Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia
zheleznyak13@mail.ru

Abstract. *Background.* Improving the quality of control of dynamic processes in electric power systems involves the widespread introduction of optimal control methods implemented using computer and microprocessor technology. *Materials and methods.* The effectiveness of optimal control significantly depends on the class of mathematical models describing processes in electric power systems. *Results.* The use of high-precision power system models for the selection of control laws does not allow real-time correction of system modes due to the large volume of calculation of the parameters of the optimal controller and insufficient convergence of computational processes. *Conclusions.* Therefore, it is necessary to rationalize mathematical models of electric power systems used to select the control law, which would avoid these difficulties and at the same time ensure the accuracy of the decision on the choice of optimal regulators.

Keywords: electric power system, quality improvement, optimal control, singular perturbations, modeling

For citation: Zhelezniak A.A. Improving the quality of dynamic process control in electric power systems. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-1

Введение

Упрощение математических моделей электроэнергетических систем (ЭЭС) обычно основано на искусственном разделении взаимосвязанных процессов динамики системы, различающимся временным масштабом изменения параметров системы [1, 2].

Более эффективные методы уменьшения размерности математических моделей ЭЭС могут быть получены на основе теории сингулярных возмущений [3]. В данной статье рассмотрена возможность практического применения методов теории сингулярных возмущений для понижения размерности решаемых задач при синтезе оптимальных регуляторов ЭЭС. В соответствии с этой теорией исходная линеаризованная модель ЭЭС

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

представляется с помощью дифференциальных уравнений, содержащих малый положительный скалярный параметр ϵ при производных от части переменных:

$$\dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + B_1u(t); \quad (2)$$

$$\epsilon \dot{x}_2(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + B_2u(t),$$

где $x_1(t)$ и $x_2(t)$ – векторы переменных состояния ЭЭС, характеризующих соответственно медленно- и быстропротекающие процессы в реальной системе.

Цель исследований

Целью исследований являлось применение теории сингулярных возмущений для возможности получения существенного упрощения модели электроэнергетических систем.

Результаты

Для проверки работоспособности метода проведено моделирование системы с использованием градиентной процедуры в задаче компенсации входного изображения.

Традиционные методы понижения размерности исходных моделей ЭЭС (1) и выбор на их основе оптимального управления предполагают пренебрежение быстропротекающими процессами и выделение медленной подсистемы [1, 3]. Так, при $\epsilon \rightarrow 0$ система (2) преобразуется к виду

$$\dot{x}_{1s} = A_{11}x_{1s} + A_{12}x_{2s} + B_1u_s; \quad (3)$$

$$0 = A_{21}x_{1s} + A_{22}x_{2s} + B_2u_s,$$

а затем к модели пониженной размерности

$$\dot{x}_s = A_s x_s + B_s u_s, \quad (4)$$

где $x_s = x_{1s}$; $A_s = A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21}$; $B_s = B_1 - A_{12}A_{22}^{-1}B_2$.

Очевидно, что такой подход может привести к существенному упрощению исходной модели и, соответственно, оптимального регулятора. Однако для каждой исследуемой модели требуется проведение специального анализа, доказывающего удовлетворительность такой аппроксимации. Кроме того, установлено, что упрощение модели ЭЭС в соответствии с выражениями (3), (4) в ряде случаев приводит к неустойчивым моделям [4].

Выделение быстрой подсистемы предполагает переход к рассмотрению изменения переменных ЭЭС в другом масштабе времени:

$$\tau = \frac{t - t_0}{\epsilon}, \quad (5)$$

при котором можно принять $x_s(\tau) = \text{const}$.

Соответственно, на этом интервале управляющее воздействие медленной подсистемы также считается неизменным. Изменение быстрых переменных x_2 во времени τ можно представить как отклонение от квазиустановившегося значения x_{2s} , рассчитанного при $\epsilon x_2 = 0$; $x_f = x_2 - x_{2s}$, а вектор управления быстрой подсистемы – как отклонение от $u_f = u - u_s$.

При этом модель быстрой подсистемы будет иметь вид

$$\epsilon \dot{x}_f(t) = A_{22}x_f(t) + B_2u_f(t) = A_f x_f(t) + B_f u_f(t) \quad (6)$$

или в масштабе времени τ :

$$\dot{x}_f(\tau) = A_{22}x_f(\tau) + B_2u_f(\tau). \quad (7)$$

Таким образом, переменные исходной модели x_1 и x_2 могут быть представлены с точностью $0(\epsilon)$:

$$x_1(t) = x_s(t) + 0(\epsilon); \quad (8)$$

$$x_2(t) = -A_{22}^{-1}A_{21}x_s(t) + x_f\left(\frac{t-t_0}{\epsilon}\right) + 0(\epsilon).$$

Выделение из полной модели ЭЭС подсистем, различающихся временными масштабами, и определение для них закона управления требуют также и разделения общесистемного критерия оптимальности J :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^t Q x + u^t R u) dt; \quad (9)$$

$$Q \geq 0; R > 0,$$

где весовые коэффициенты Q и R вычисляются, исходя из допустимых пределов изменения переменных векторов x и u .

Предполагая, что матрица имеет блочно-диагональную форму $Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix}$, критерии оптимальности подсистем будут иметь вид

$$J_s = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x_s^t Q_s x_s + u_s^t R u_s) dt; \quad (10)$$

$$J_f = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x_f^t Q_f x_f + u_f^t R u_f) dt, \quad (11)$$

где Q_s и Q_f – весовые коэффициенты соответствующих критериев оптимальности.

Минимизация критериев (10) и (11) позволяет получить закон оптимального управления подсистемами (4) и (6) ЭЭС типа

$$u_s(t) = -K_s x_s(t) = -R^{-1} B_s^t P_s x_s(t); \quad (12)$$

$$u_f(t) = -K_f x_f(t) = -R^{-1} B_f^t P_f x_f(t), \quad (13)$$

где коэффициенты матриц P_s и P_f вычисляются в результате решения матричных уравнений Риккати:

$$P_s A_s - A_s^t P_s - P_s B_s R^{-1} B_s^t P_s + Q_s = 0; \quad (14)$$

$$P_f A_f - A_f^t P_f - P_f B_f R^{-1} B_f^t P_f + Q_f = 0, \quad (15)$$

где P_s, A_s, B_s – устойчивые части блочной матрицы.

При этом закон оптимального управления ЭЭС определяется как

$$u(t) = u_s(t) + u_f(t) = -K_s x_s(t) - K_f x_f(t), \quad (16)$$

где K_s и K_f – регулятор системы, содержащий два параллельных канала регулирования с матрицами коэффициентов. Расчет коэффициентов регуляторов K_s и K_f выполняется отдельно по моделям подсистем (4) и (6), имеющих меньшую размерность по сравнению с исходной математической моделью ЭЭС (1).

Точность данного метода представления модели ЭЭС и определения параметров регуляторов проанализирована на примере ЭЭС, содержащей синхронный генератор, работающий через двухцепную линию электропередач на шины бесконечной мощности. В качестве исходной модели энергосистемы использована модель [5] с вектором переменных $x = [\Delta_\omega \ \Delta_\delta \ \Delta I_f \ \Delta E_f \ \Delta I_d \ \Delta I_q \ \Delta I_D \ \Delta I_Q]^T$, где Δ_δ – изменение угла между ЭДС генератора и вектором напряжения статора, Δ_ω – изменение угловой частоты вращения магнитного поля.

При параметрах синхронного генератора: $P_{ном} = 1,00$; $x_d = 1,83$; $x_D = 1,53$; $R_D = 0,013$; $\cos\varphi = 0,85$; $x_q = 1,77$; $x_Q = 1,49$; $R_Q = 0,044$; $T_J = 11,78$; $x_f = 1,61$; $T_{d0} = 5,10$ и параметрах линии $z_{л} = 0,02 + j 0,43$ матрицы состояния и управления линеаризованной модели (1) ЭЭС имеют вид

$$A = \begin{bmatrix} -0,01 & 0,01 & -0,01 & 0,00 & -0,02 & 0,00 & -0,04 & -0,01 \\ 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 42,27 & -30,28 & -0,25 & 0,28 & 44,04 & 0,62 & 60,30 & 3,84 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,04 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -86,75 & -116,57 & -129,38 & 0,00 & -6,17 & 175,29 & 1,76 & -129,38 \\ -122,23 & 87,57 & 0,02 & -0,03 & -127,35 & -1,80 & -174,36 & 0,71 \\ 88,84 & 11,37 & 132,49 & 0,00 & 4,50 & -179,50 & -1,80 & 132,40 \\ 77,20 & -55,31 & 0,22 & -0,24 & 80,43 & 1,14 & 110,12 & -4,80 \end{bmatrix}$$

Собственные значения матрицы состояния A исходной системы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Собственные значения матрицы состояния ЭЭС без оптимальных регуляторов

A	A_s	\dot{A}_s
-0,03970	-0,02257	-0,03980
-0,04183	-0,03596 ± j0,17120	-0,05961 ± j0,21955
-0,05966 ± j0,21972	-0,03980	-0,04187
-1,80942 ± j49,93981	–	–
-4,98150	–	–
-6,15914	–	–

В качестве матриц Q и R критерия оптимальности (9) выбраны диагональные матрицы:

$$Q = \text{diag}[1000, 1000, 1000, 1000, 10, 10, 10, 10]; R = 1.$$

Для оценки эффективности рассматриваемых законов управления сначала проверен расчет оптимального регулятора по полной модели ЭЭС (1) с применением уравнения Риккати. В результате проверен закон оптимального управления

$$u(t) = -Kx(t) \quad (17)$$

с матрицей коэффициентов регулятора, приведенного ниже:

$$K = [26, 03812, 75037, 52531, 5910, 15534, 9580, 16734, 794].$$

Введение такого закона приводит к изменению матрицы состояния модели электроэнергетической системы $A^* = A = KB$ (собственное значение матрицы).

Собственные значения матрицы A^* модели ЭЭС с оптимальным регулятором представлены в табл. 2.

Таблица 2

Модели ЭЭС с оптимальным регулятором

A^*	A_s^*	\bar{A}_s^*
$-0,06250 \pm j0,21639$	$-0,03434$	$-6,83901$
$-0,06523$	$-0,03619 \pm j0,17131$	$-0,06087$
$-4,99642$	$-6,89384$	$-0,06161 \pm j0,21855$
$-1,80942 \pm j49,93981$	–	–
$-6,15912$	–	–
$-6,88265$	–	–

Графики переходных процессов при возмущении в системе (отключение одной линии) для переменных Δ_δ , Δ_ω и ΔE_f при оптимальном регуляторе, рассчитанном по полной модели ЭЭС, представлены на рис. 1–3 (кривые 1).

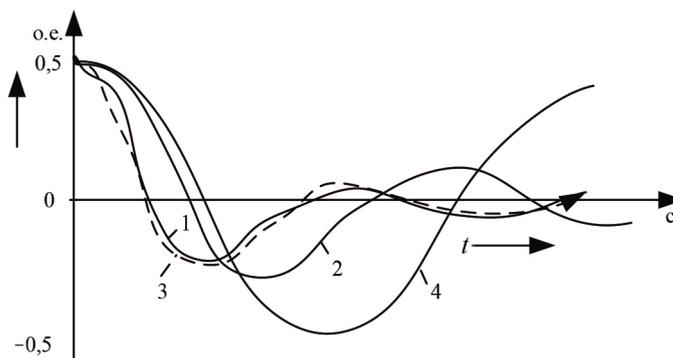


Рис. 1. Изменение приращения угла Δ_δ при возмущении в ЭЭС

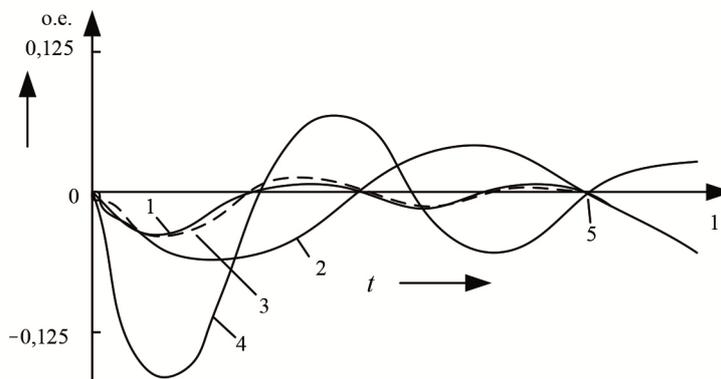


Рис. 2. Изменение приращения угла Δ_ω при возмущении в ЭЭС

Анализ собственных значений матрицы A исследуемой модели [2, 7] позволяет выделить два различающихся по скорости протекания процесса, характеризующих электромеханические и электромагнитные процессы в статорной и демпферной обмотках с векторами переменных:

$$x_1 = [\Delta_\omega \Delta_\delta \Delta I_f \Delta E_f]^t;$$

$$x_2 = [\Delta I_d \Delta I_q \Delta I_D \Delta I_Q]^T.$$

Если в управлении (16) не учитывать воздействие быстрых переменных x_1 , можно получить упрощенный одноканальный регулятор, непосредственно воздействующий на медленно протекающие процессы. Поэтому рассматривается только медленная подсистема ЭЭС и закон ее управления. Матрицы состояния и управления этой подсистемы в соответствии с выражением (4) будут выглядеть так:

$$A_s = \begin{bmatrix} -0,0720 & -0,0306 & -0,0110 & 0,0006 \\ 1,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0005 & 0,0002 & -0,0225 & 0,0247 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0398 \end{bmatrix};$$

$$B_s = [0, 00000, 00000, 00000, 218]^T.$$

Матрица коэффициентов K_s субоптимального регулятора генератора (12) имеет следующие значения:

$$K_s = [-1, 17131, 884515, 720331, 4969].$$

Собственные значения матрицы состояния системы с субоптимальным регулятором $A_s^* = A_s - K_s B_s$ приведены в табл. 2.

Графики переходных процессов при возмущении в системе с использованием рассмотренного принципа управления представлены на рис. 1–3 кривыми 2.

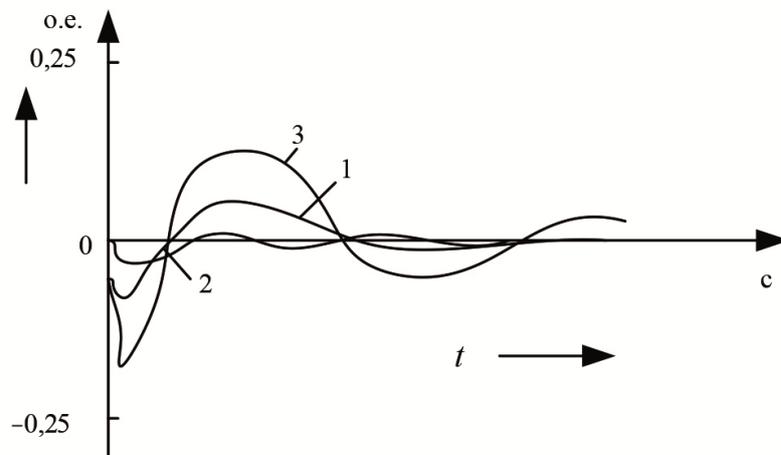


Рис. 3. Изменение приращения угла ΔE_f при возмущении в ЭЭС

Анализ собственных значений матриц состояния моделей ЭЭС без оптимальных регуляторов и при их наличии (см. табл. 1 и 2) показывает, что итерационные методы позволяют проводить разложение модели ЭЭС на независимые подсистемы с достаточно высокой точностью (см. табл. 1).

Закон оптимального управления, синтезированный на основе полученных независимых подсистем ЭЭС, дает возможность обеспечить качество управления в динамических режимах, практически не отличающееся от управления, обеспечиваемого расчетом по полной модели ЭЭС (см. табл. 2). Приведенные на рис. 1–3 графики также показывают эффективность рассмотренного метода декомпозиции модели ЭЭС и выбора закона управления.

Заключение

Таким образом, регуляторы показывают, что применение теории сингулярных возмущений дает возможность получить существенное упрощение моделей ЭЭС, описывающих их

динамические свойства. Соответственно, структура оптимального регулятора исследуемой системы и его расчет значительно упрощаются. При этом точность решения практически не отличается от точности расчета по полной модели синхронного генератора. Однако более точное решение разделения ЭЭС на подсистемы может быть получено в результате применения итерационных методов.

Список литературы

1. Жиленков А. А., Титов И. Л., Черный С. Г. Моделирование процесса повышения надежности автоматических систем управления в автономных системах объектов морского транспорта // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2015. № 4. С. 198–207.
2. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. P. 1247–1252.
3. Жиленков А. А., Черный С. Г. Повышение эффективности систем автоматического управления автономными буровыми установками за счет разработки методов обеспечения их совместимости и интеграции // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2015. № 4. С. 9–18.
4. Железняк А. А. Подавление низкочастотных помех судовых электроэнергетических систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1. С. 13–18.
5. Bogomolov A. V., Zinkin V. N., Alekhin M. D. [et al.]. Information-Logical Modeling of Information Collection and Processing at the Evaluation of the Functional Reliability of the Aviation Ergate Control System Operator // *Human Factors in Complex Technical Systems and Environments : proc. of the Third International Conference Ergo-2018 (Saint-Petersburg, July 4–7, 2018)*. 2018. P. 315–323.
6. Zamyshlyayeva A. A., Sviridyuk G. A. The Linearized Benney–Luke Mathematical Model with Additive White Noise // *Semigroups of Operators – Theory and Applications* / ed. by J. Banasiak, A. Bobrowski, M. Lachowicz. Springer Proceedings in Mathemat, 2015. P. 327–337.
7. Isidori A. Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2010. Vol. 18. P. 693–714.

References

1. Zhilenkov A.A., Titov I.L., Chernyy S.G. Modeling of the process of increasing the reliability of automatic control systems in autonomous systems of marine transport facilities. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova = Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. 2015;(4):198–207. (In Russ.)
2. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology. *Procedia Engineering*. 2015;100:1247–1252.
3. Zhilenkov A.A., Chernyy S.G. Improving the efficiency of automatic control systems for autonomous drilling rigs by developing methods to ensure their compatibility and integration. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti = Automation, telemechanization and communication in the oil industry*. 2015;(4):9–18. (In Russ.)
4. Zheleznyak A.A. Suppression of low-frequency interference of marine electric power systems. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and information complexes and systems*. 2021;(1):13–18. (In Russ.)
5. Bogomolov A.V., Zinkin V.N., Alekhin M.D. [et al.]. Information-Logical Modeling of Information Collection and Processing at the Evaluation of the Functional Reliability of the Aviation Ergate Control System Operator. *Human Factors in Complex Technical Systems and Environments: proc. of the Third International Conference Ergo-2018 (Saint-Petersburg, July 4–7, 2018)*. 2018:315–323.
6. Zamyshlyayeva A.A., Sviridyuk G.A. The Linearized Benney–Luke Mathematical Model with Additive White Noise. *Semigroups of Operators – Theory and Applications*. Springer Proceedings in Mathemat, 2015:327–337.
7. Isidori A. Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2010;18:693–714.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Александрович Железняк
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования судов
и автоматизации производства,
Керченский государственный морской
технологический университет

Aleksandr A. Zhelezniak
Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of electrical equipment of ships
and industrial automation,
Kerch State Marine Technological University

(Россия, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82)

(82 Ordzhonikidze street, Kerch, Russia)

E-mail: zheleznyak13@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

УДК 004.738
doi:10.21685/2307-5538-2022-1-2

СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ГОРОДСКОГО УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИОТ-ПЛАТФОРМЫ

М. С. Никитин¹, А. Ю. Тычков²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ nikitin-m.s@mail.ru, ²tychkov-a@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Система управления освещением в городской среде направлена на повышение энергоэффективности осветительных приборов. Применение подобных систем позволит значительно сократить расходы на электроэнергию в городской среде. Целью исследования является нахождение и разработка оптимального решения для контроля уровня освещенности городских осветительных приборов в зависимости от активности движения транспортных средств и населения. *Материалы и методы.* Для исследования интеллектуальных городских систем управления освещением использовались методы анализа и синтеза аналогичных систем и методы моделирования и визуализации разработанного решения. *Результаты и выводы.* Исследована система интеллектуального городского освещения, способная регулировать интенсивность света в зависимости от активности движения на территории мониторинга. Предлагаемая система рассматривается как инструмент решения задач энергосбережения и основа для проектирования умного города.

Ключевые слова: умный город, умный свет, детектор движения, световая точка, интеллектуальное уличное освещение, ИОТ-платформа, ZigBee коммуникация, энергосбережение

Для цитирования: Никитин М. С., Тычков А. Ю. Система интеллектуального городского уличного освещения на основе ИОТ-платформы // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 13–20. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-2

SMART CITY STREET LIGHTING SYSTEM BASED ON IOT PLATFORM

M.S. Nikitin¹, A.Yu. Tychkov²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia

¹ nikitin-m.s@mail.ru, ²tychkov-a@mail.ru

Abstract. *Background.* Lighting control systems in urban environments aim to improve the energy efficiency of lighting systems. The introduction of such technologies will significantly reduce energy costs in the urban environment. The aim of the study is to find and develop an optimal solution for controlling the illumination level of urban lighting devices, depending on the traffic activity of vehicles and the population. *Materials and methods.* To study intelligent urban lighting control systems, methods of analysis and synthesis of similar systems, and methods of modeling and visualization of the developed solution were used. *Results and conclusions.* An intelligent urban lighting system capable of adjusting the light intensity depending on traffic activity in the monitoring area has been investigated. The proposed system is considered as a tool for solving energy conservation problems and the basis for designing a smart city.

Keywords: smart city, smart light, motion detector, light point, intelligent street lighting, IOT platform, ZigBee communication, energy saving

For citation: Nikitin M.S., Tychkov A.Yu. Smart city street lighting system based on IOT platform. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):13–20. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-2

Введение

В настоящее время рынок интеллектуальных систем управления освещением в городской среде активно развивается. По данным аналитических агентств [1], до 2025 г. в направлении «умный город» в мире будет инвестировано более 57 млрд долл. для обеспечения светодиодных уличных фонарей и 12,6 млрд долл. для интеллектуальных платформ управления.

По разным оценкам, внедрение интеллектуальных систем управления уличным освещением позволит снизить расходы на электроснабжение почти на 60 % [1]. В связи с этим по всему миру производится замена традиционных источников света (лампы накаливания, ртутные, натриевые лампы) на светодиодное освещение. Наиболее популярным становится объединение уличных фонарей в единую сеть и создание умных городских осветительных сетей как ключевого элемента «умного города».

Тенденция развития «умного города»

«Умный город» – это инфраструктура, которая использует технологии Интернета вещей, искусственного интеллекта, виртуальной и дополненной реальности (VR/AR), BigData для повышения уровня жизни граждан и удовлетворения их потребностей в экономических, социальных и культурных сферах [2].

Для создания умного города необходима основа, на которой строится система функционально связанных решений, способных к взаимодействию между собой. Современные города уже обладают необходимой инфраструктурой, что не потребует дополнительных вложений в развитие отрасли. Имеющееся уличное городское освещение создает важные предпосылки для создания интеллектуальной городской инфраструктуры. Световые точки в стандартных системах освещения работают в ночное время и лишены интеллектуальных модулей управления, что не энергоэффективно и не безопасно, особенно в условиях ограниченной видимости. Внедрение технологий IoT (Интернета вещей) в интеллектуальные системы управления позволит реализовать следующие функции «умного города»:

- автоматическое уведомление о неисправностях и отключениях в режиме реального времени;
- моделирование осветительной карты особо опасных участков городской местности (например, подъемы и спуски с поворотами автодороги);
- функция смены работы уличного освещения день-ночь с помощью GPS-датчиков (для автомобильных дорог с большой пропускной способностью потока);
- функция контроля освещения при неожиданном снижении уровня естественного света (в условиях недостаточной видимости) с помощью датчиков освещенности;
- дистанционное управление каждой отдельной световой точкой; группой точек или индивидуальные сценарии освещенности. С помощью индивидуального управления можно регулировать яркость осветительных приборов не линейными способами, а также контролировать каждое устройство в цепи, не отключая при этом всю линию;
- функция диммирования светильника с помощью датчиков движения.

Вышепредставленные функции умного городского освещения позволят реализовать новые городские возможности [3]:

- интенсивности движения;
- мониторинг и управление загруженностью автостоянок;
- управление отходами;
- измерение видимости на городских дорогах;
- контроль общественной безопасности;
- измерение концентрации вредных веществ (таких как аллергены или выбросы) в воздухе и т.д.

В концепции умного города световые точки могут быть преобразованы в узлы для измерения, приема и передачи данных в режиме реального времени. Сбор и передача данных могут осуществляться с помощью стандартизированных аппаратных средств и систем BigData или путем агрегирования приложений и систем, способных взаимодействовать друг с другом через API [4]. В результате будет создаваться структурированная база данных, которая может помочь в решении конкретной проблемы, возникшей в условиях городской среды. Это причина, по которой уличное освещение создает идеальные условия для создания инфраструктуры умного города с помощью умного света [5].

Эффективная взаимосвязь всех функций приведет к открытой платформе умного города, которая позволит интегрировать огромное количество систем и приложений.

Концепция умного городского освещения на основе IoT-платформы

Для создания умного города необходим мощный инструмент, каким является IoT-платформа. Интернет вещей [6] – это множество физических объектов, подключенных к Интернету для обмена данными в режиме реального времени как напрямую, так и через онлайн-серверы.

Концепция умного городского освещения на основе IoT-платформы предусматривает создание системы для мониторинга и управления освещением, используя технические возможности сетей Wi-Fi, GSM, ZigBee, LoRaWAN. Платформа должна быть основана на взаимосвязи конечных устройств, данные которых можно получать для обработки и анализа, и передавать в системы пользовательского интерфейса, включающие веб- или мобильные приложения. Она позволит использовать передовые функциональные возможности беспроводных сетей, что с точки зрения инфраструктуры является важной предпосылкой для «умного города» [7].

В настоящей статье представлено исследование городской системы интеллектуального управления освещением (ГСИУО) [8], способной регулировать интенсивность освещения в зависимости от активности движения на территории мониторинга. ГСИУО посредством исполнительных механизмов и коммуникационных узлов детектирует движение объектов, вычисляет скорость объекта и передает оператору информацию через единую сеть (рис. 1). Дополнительным назначением ГСИУО является контроль общественной безопасности, сбор данных о городском трафике, измерение концентрации вредных веществ в воздухе, автоматическое уведомление о неисправностях и отключениях в режиме реального времени и т.д.

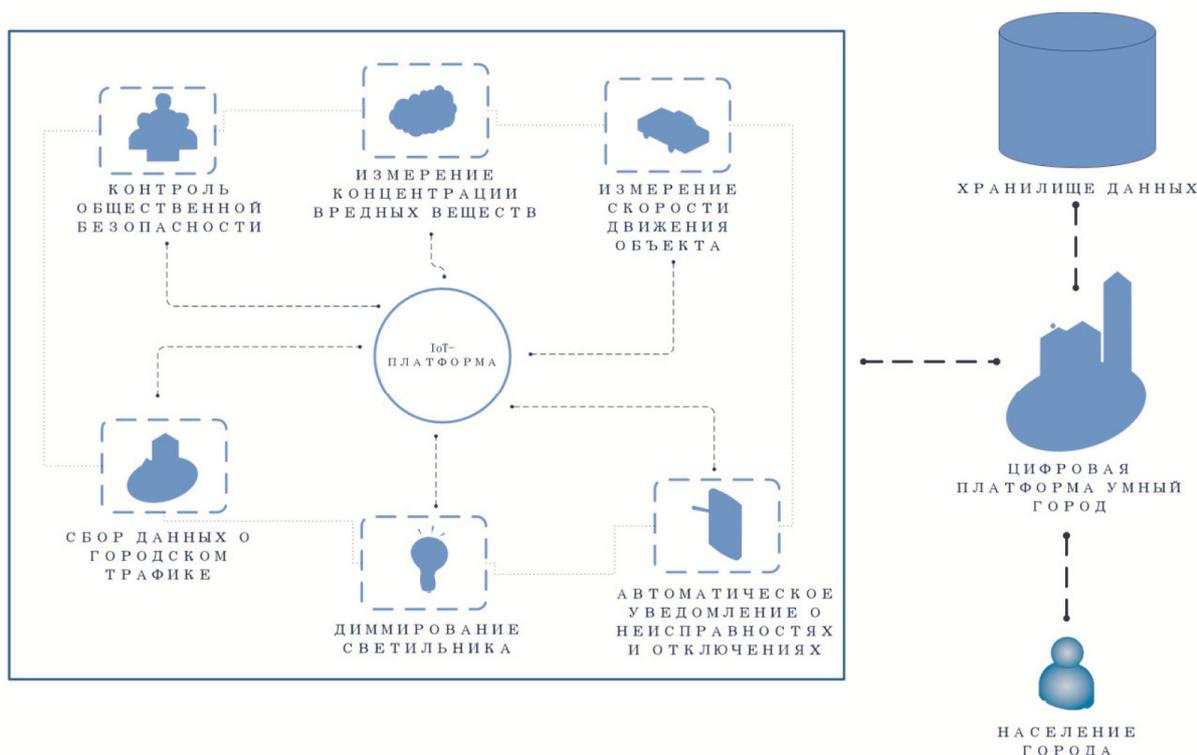


Рис. 1. Схема ГСИУО в умном городе

Каждая световая точка системы умного городского уличного освещения – это подсистема со своим уникальным порядковым номером. Подсистема состоит из микроконтроллера, микроволнового детектора движения, светильника и интерфейсного модуля.

Схема узлов одной световой точки системы интеллектуального городского уличного освещения показана на рис. 2.

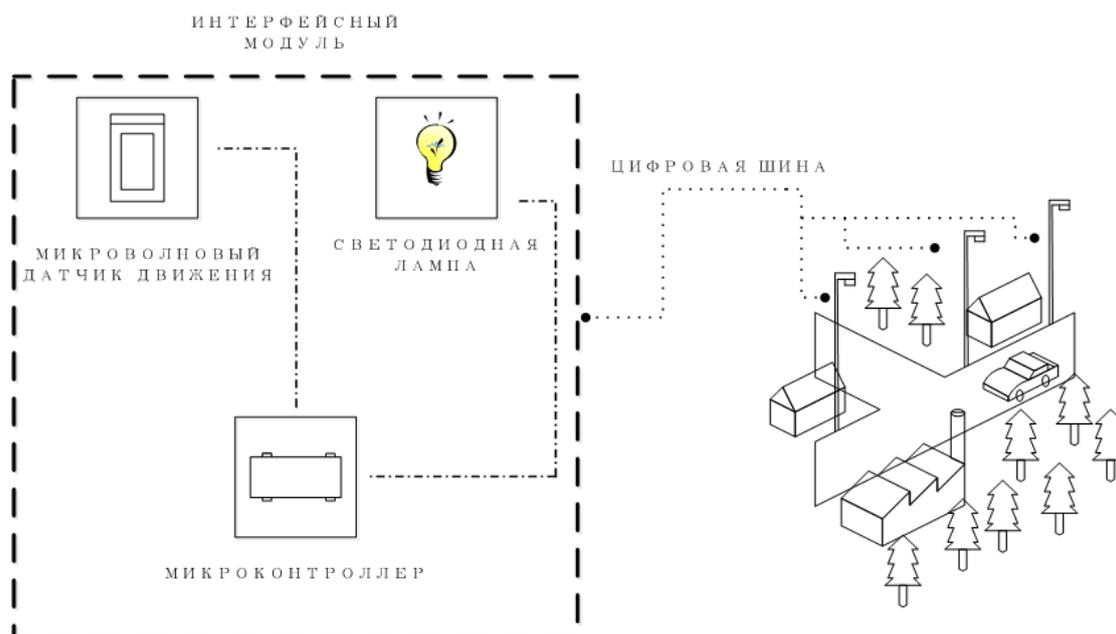


Рис. 2. Схема одной световой точки ГСИУО

Представленная система работает следующим образом. В отсутствии движения светильники работают на 20 % своей мощности. Если в зоне действия одной световой точки появляется движущийся объект (человек, транспортное средство и др.), срабатывает микроволновый датчик движения, который фиксирует информацию о его присутствии и измеряет параметры для расчета скорости движения объекта. Далее информация подается на микроконтроллер, где согласно полученным данным определяется скорость движения объекта, время за которое объект достигнет следующей световой точки, количество световых точек и их порядковые номера. Установленные по ходу движения объекта светильники будут плавно переключаться в режим повышенной мощности (100 %). Вся информация через цифровую шину передается микроконтроллером на интерфейсный модуль вместе с информацией порядкового номера другим световым точкам. По мере удаления объекта от световой точки светильник плавно гаснет до режима пониженного энергосбережения.

Главным аспектом при создании ГСИУО в умном городе является определение протоколов Интернета вещей для IoT-устройств, т.е. способов их подключения и взаимосвязи.

Протоколы передачи данных для умного города

К основным способам беспроводной передачи данных можно отнести WiFi 802.11ac (WiFi 5), 802.11ax (WiFi 6), сети поколений 4G и 5G (архитектура идентична WiFi 6), для параметрических данных Bluetooth, ZigBee и ранние версии WiFi (например, WiFi 4) (табл. 1) [9].

Таблица 1

Сравнительная характеристика беспроводных технологий

Показатели	Bluetooth	ZigBee	WiFi 4
Стандарт IEEE	802.15.1	802.15.4	802.11n
Частота	2.4 GHz	900 MHz/ 2.4 GHz	2.4GHz/ 5.1 – 5.8 GHz
Max bit rate, Mbit/s	1 Mbit/s	250 Kbit/s	450 Mbit/s
Ном. Диапазон, м	10	100	100
Количество радиоканалов	79	16	24
Максимальное количество узлов в сети	7	2 ⁶⁴	32
Время работы батареи, дней	1–7	100–1000	1–5

Протоколы беспроводной передачи данных, такие как Wi-Fi, GSM или Bluetooth, являются неподходящими для использования в системе интеллектуального уличного городского

освещения, где в условиях длительной работы требуется невысокая скорость передачи данных и высокий показатель энергоэффективности [10].

ZigBee – это открытый протокол верхнего уровня, который является оптимальным техническим решением для создания умного городского освещения. Связь в сети ZigBee осуществляется посредством передачи пакетов данных между координатором, маршрутизаторами и конечными устройствами [9]. Сеть имеет ячеистую систему, в случае выхода из строя одного из компонентов сети, пакеты данных отправляются на другой, т.е. сохраняется непрерывность информационного канала во времени.

Конечные устройства (узлы, функция которых детектировать информацию) умного городского освещения между собой не связаны, поэтому умный город большую часть времени находится в режиме энергосбережения (спящий режим). Протокол ZigBee выделяет под адрес устройства 16 бит информации, предоставляя возможность подключаться к сети до 65536 конечных устройств [11].

На рис. 3 представлена архитектура системы интеллектуального управления освещением, основанная на протоколе ZigBee [12].

При создании ГСИУО в умном городе следует обратить внимание на то, что каждая световая точка должна быть оснащена детектором для обнаружения движения. В настоящее время известно несколько типов подобных датчиков, различающихся по методам получения информации.

Типы обнаружения движения

Детекторы движения по принципу действия можно разделить на два типа [13]: пассивные и активные.

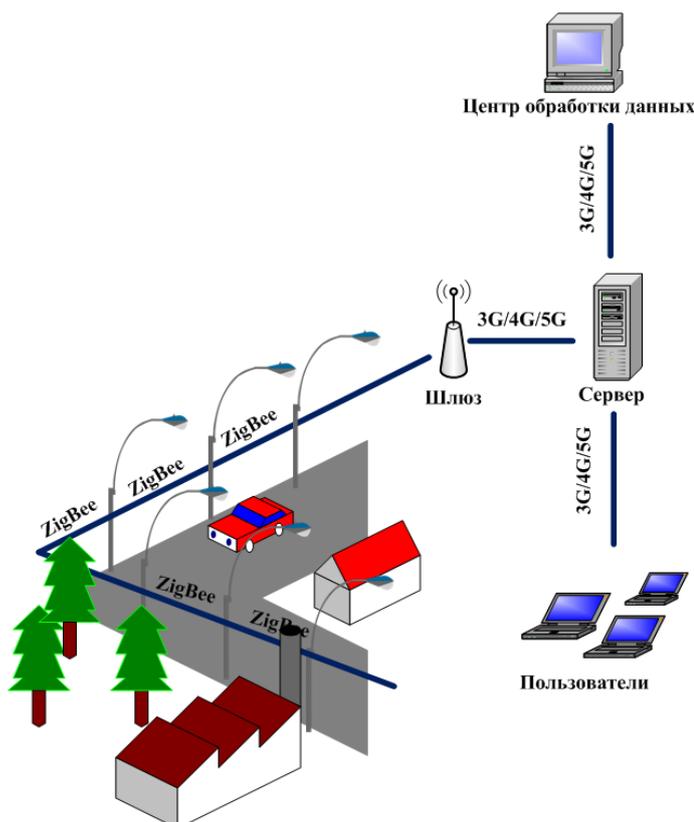


Рис. 3. Архитектура сети ГСИУО, основанная на протоколе ZigBee

Пассивные датчики движения не нуждаются в дополнительном источнике энергии. Пассивные ИК чувствительные элементы (чаще всего применяются пироэлектрические элементы, а датчики на их основе – PIR-датчики) реагируют на излучения дальнего и среднего ИК спектрального диапазона с длинами волн в интервале 4 ... 20 мкм (тело среднего здорового чело-

века излучает в диапазоне около 9 мкм). Принцип действия основан на детектировании излучений, исходящих от поверхности движущегося объекта в окружающую среду, причем имеющих более высокие температуры по сравнению с окружающей средой для формирования оптическим устройством на поверхности сенсора оптического контраста [14].

Активный датчик движения для своей работы требует источник внешней дополнительной энергии. Принцип их работы основан на приеме отраженных электромагнитных волн. Основными типами активных датчиков движения являются: радары, основанные на эффекте Доплера (микроволновые), и ультразвуковые датчики.

Радары, основанные на эффекте Доплера, – это детекторы, которые передают эталонный сигнал и принимают отраженный. Энергия может передаваться в виде любого излучения – электромагнитные волны ультразвукового или микроволнового диапазонов. При столкновении любых волн с объектом часть их энергии отражается. Когда объект движется по направлению к антенне или от нее, частота отраженного излучения меняется. При движении объекта от антенны частота отраженного сигнала уменьшается, а при приближении объекта – возрастает [15]. В момент времени, когда объект приближается к детектору под некоторым углом θ , частоту Доплера можно рассчитать по следующей формуле:

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda_0} \cos \theta,$$

где v – скорость объекта; λ_0 – длина передаваемой волны; θ – угол между фактическим направлением движения и соединительной линией.

В доплеровских радарх частота линейно пропорциональна скорости движения объекта. В таких датчиках для определения скорости необходимо вычислить частоту Доплера и фазу направления смещения, при условии, что радиопередатчик будет вырабатывать высокочастотный радиосигнал не непрерывно, а короткими импульсами [16]. Таким образом, приемник получает сигнал только в строго заданном интервале времени с временной задержкой, пропорциональной расстоянию от антенны до объекта:

$$t_d = \frac{2D}{c},$$

где c – скорость света.

На рис. 4 показана схема микроволнового детектора движения.

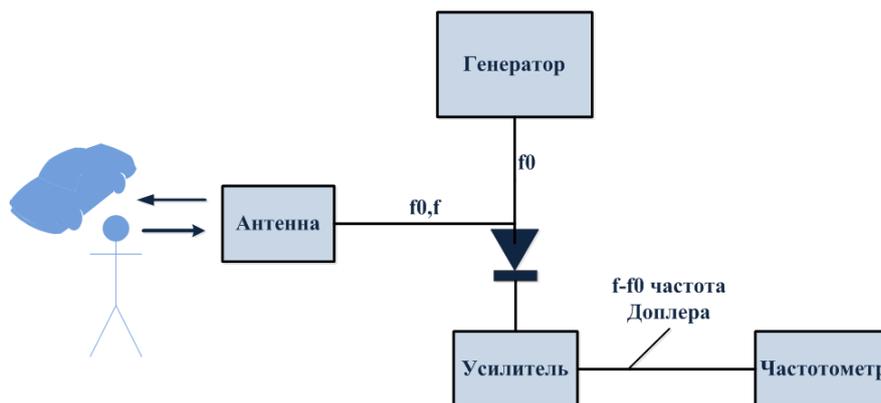


Рис. 4. Схема микроволнового детектора движения

Микроволновый радар, основанный на эффекте Доплера, является оптимальным решением для городской системы интеллектуального управления освещением, так как он [17]:

- не несет в себе оптических компонентов и может встроиться в систему без изменения внешнего вида светильника;
- имеет широкий температурный диапазон работы;
- не чувствителен к влиянию внешних погодных условий и препятствий;
- может определить скорость объекта и его наличие в зоне покрытия детектора.

Заклучение

Рассмотренная система направлена на интеллектуальное управление уличным освещением, способная регулировать интенсивность освещения в зависимости от активности движения на территории мониторинга.

Интеллектуальная система управления городским освещением разработана на основе концепции умного города и Интернета вещей (IoT) и предназначена для регулировки интенсивности освещения в зависимости от активности движения на территории мониторинга.

Список литературы

1. Iot.ru Новости интернета вещей – Управление уличным освещением. URL: <https://iot.ru/gorodskaya-sreda/upravlenie-ulichnym-osveshcheniem-kogda-v-rossii-stanet-svetlo-po-umnomu> (дата обращения: 07.09.2021).
2. Умный (Smart) свет в умном городе. URL: <https://www.intelvision.ru/blog/infrastruktura-v-umnom-gorode> (дата обращения: 08.09.2021).
3. Умный свет, как инфраструктура умного города. URL: <https://intelvision-ru.turbopages.org/intelvision.ru/s/blog/infrastruktura-v-umnom-gorode> (дата обращения: 19.09.2021).
4. Tetervenoks O., Avotiņš A., Fedorjana N. [et al.]. Potential Role of Street Lighting System for Safety Enhancement on the Roads in Future // IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019). 2019. P. 349–353.
5. Кузьмин А. С., Шевченко К. Д., Азаров А. А., Широков И. Б. Интеллектуальное освещение улиц и дорог // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций «РТ-2017»: материалы 13-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. Севастополь, 2017. С. 116.
6. Что такое IoT и что о нем следует знать. URL: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/549550/> (дата обращения: 01.10.2021).
7. Как светодиоды сделают город умным. URL: <https://abclight.ru/blog/smart-city/> (дата обращения: 26.09.2021).
8. Марончук И. И., Шевченко К. Д., Широков И. Б., Мирончук В. И. Система интеллектуального светодиодного освещения // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 440–450.
9. Ковалева А. А., Ковалева А. А., Ковалева Д. А. [и др.]. Протокол ZigBee беспроводной передачи данных // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 5-1. С. 206–210.
10. Кузяшев А. Н., Смолин А. Е. Интернет вещей, умный дом и умные города // Эпоха науки. 2021. № 25. С. 174–176.
11. Строева А. Р., Хлебужарова П. М. Интернет вещей: умный город // Цифровая парадигма развития общества: взгляд из будущего: сб. науч. тр. по итогам студ. науч.-практ. конф. Саратов, 2019. С. 117–118.
12. Водовозов А. М., Бурцев А. В. Интеллектуальная система уличного освещения на основе парадигмы Интернета вещей // Вестник Череповецкого государственного университета. 2021. № 3. С. 7–17.
13. Tetervenoks, O., Suskis, P., Stegura, J. Integration of Microwave Sensor into Low Cost Indoor LED Lamp – Element of Smart Lighting System // 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering AIEEE. 2017. P. 64–67.
14. IoT в городе: сегодня и завтра. URL: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/549550/> (дата обращения: 01.11.2021).
15. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. С. 592.
16. Грачева А. А., Русанова Е. А. «УМНЫЙ ГОРОД» («SMART CITY»): Инновационное развитие территорий и цифровая трансформация экономики страны // Вектор экономики. 2018. № 10. С. 59.
17. Электротехнический форум Электро 51 – системы управления освещением по технологии LORAWan. URL: <https://forum.electro51.ru/index.php?topic=1373.0> (дата обращения: 01.11.2021).

References

1. Iot.ru Internet of Things News – Street Lighting management. (In Russ.). Available at: <https://iot.ru/gorodskaya-sreda/upravlenie-ulichnym-osveshcheniem-kogda-v-rossii-stanet-svetlo-po-umnomu> (accessed 07.09.2021).
2. Smart light in a smart city. (In Russ.). Available at: <https://www.intelvision.ru/blog/infrastruktura-v-umnom-gorode> (accessed: 08.09.2021).
3. Smart light as the infrastructure of a smart city. (In Russ.). Available at: <https://intelvision-ru.turbopages.org/intelvision.ru/s/blog/infrastruktura-v-umnom-gorode> (accessed 19.09.2021).
4. Tetervenoks O., Avotiņš A., Fedorjana N. [et al.]. Potential Role of Street Lighting System for Safety Enhancement on the Roads in Future. *IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019)*. 2019:349–353.

5. Kuz'min A.S., Shevchenko K.D., Azarov A.A., Shirokov I.B. Intelligent lighting of streets and roads. *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy «RT-2017»: materialy 13-y Mezhdunar. molodezhnoy nauch.-tekhn. konf. = Modern problems of radio electronics and telecommunications "RT-2017" : materials 13th International. youth science and technology. conf. . Sevastopol, 2017:116. (In Russ.)*
6. What is IoT and what you should know about it. (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/549550/> (accessed 01.10.2021).
7. How LEDs will make the city smart. (In Russ.). Available at: <https://abclight.ru/blog/smart-city/> (accessed 26.09.2021).
8. Maronchuk I.I., Shevchenko K.D., Shirokov I.B., Mironchuk V.I. Intelligent LED lighting system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG = Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS. 2018;61(5):440–450. (In Russ.)*
9. Kovaleva A.A., Kovaleva A.A., Kovaleva D.A. [et al.]. ZigBee wireless data transmission protocol. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2018;(5-1):206–210. (In Russ.)*
10. Kuzyashev A.N., Smolin A.E. Internet of things, smart home and smart cities. *Epokha nauki = Epoch of Science. 2021;(25):174–176. (In Russ.)*
11. Stroeveva A.R., Khlebozharova P.M. Internet of things: smart city. *Tsifrovaya paradigma razvitiya obshchestva: vzglyad iz budushchego: sb. nauch. tr. po itogam stud. nauch.-prakt. konf. = Digital paradigm of society development: a view from the future : collection of scientific tr. based on the results of the student scientific and practical conference. Saratov, 2019:117–118. (In Russ.)*
12. Vodovozov A.M., Burtsev A.V. Intelligent street lighting system based on the Internet of Things paradigm. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Cherepovets State University. 2021;(3):7–17. (In Russ.)*
13. Tetervenoks, O., Suskis, P., Stegura, J. Integration of Microwave Sensor into Low Cost Indoor LED Lamp – Element of Smart Lighting System. *5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering AIEEE. 2017:64–67.*
14. IoT in the city: today and tomorrow. (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/549550/> (accessed 01.11.2021).
15. Frayden Dzh. *Sovremennye datchiki. Spravochnik = Modern sensors. Reference book. Moscow: Tekhnosfera, 2005:592. (In Russ.)*
16. Gracheva A.A., Rusanova E.A. "SMART CITY": Innovative development of territories and digital transformation of the country's economy. *Vektor ekonomiki = Vector of Economics. 2018;(10):59. (In Russ.)*
17. Electrotechnical Forum Electro 51 – lighting control systems using LoRaWAN technology. (In Russ.). Available at: <https://forum.electro51.ru/index.php?topic = 1373.0> (accessed 01.11.2021).

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Сергеевич Никитин

студент,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nikitin-m.s@mail.ru

Michael S. Nikitin

Student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Тычков

доктор технических наук,

профессор кафедры радиотехники

и радиоэлектронных систем,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Alexander Yu. Tychkov

Doctor of technical sciences,

professor of the sub-department of radioengineering

and radioelectronic systems,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования / Revised 24.06.2021

Принята к публикации / Accepted 29.09.2021

УДК 681.586
doi:10.21685/2307-5538-2022-1-3

ИНФРАКРАСНЫЕ ДАТЧИКИ КРЕНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В. Е. Драч¹, Д. А. Кондратов², А. А. Шмелькова³

¹ Сочинский государственный университет, Сочи, Россия

^{2,3} Калужский филиал Московского государственного
технического университета имени Н. Э. Баумана, Калуга, Россия

^{1,2,3} rpd-admin@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время для определения угловой ориентации летательного аппарата широко используются датчики крена. В статье приводится сравнительный обзор датчиков, которые определяют крен разными способами. *Материалы и методы.* Особое внимание уделяется инфракрасным (ИК) датчикам крена. Детально описан принцип функционирования. Описано влияние конструкции оптического окна на показания ИК датчиков, приведена оценка влияния нагрева корпуса и окружающих газов на показания термопар, а также показано влияние погодных условий и подстилающей поверхности на работу датчика. *Вывод.* Сделан вывод о том, что ИК датчики обладают рядом преимуществ в отличие от других типов датчиков и могут быть использованы для получения данных при ориентации летательного аппарата.

Ключевые слова: крен, ИК датчик, МЭМС-термопара, летательный аппарат, угловая ориентация

Для цитирования: Драч В. Е., Кондратов Д. А., Шмелькова А. А. ИК датчики крена для определения угловой ориентации летательного аппарата // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 21–30. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-3

IR ROLL SENSOR FOR DETERMINATION OF AN ANGULAR ORIENTATION OF THE AIRCRAFT

V.E. Drach¹, D.A. Kondratov², A.A. Shmelkova³

¹ Sochi State University, Sochi, Russia

^{2,3} Kaluga branch of the Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russia

^{1,2,3} rpd-admin@inbox.ru

Abstract. *Background.* Currently, roll sensors are widely used to measure the roll of an aircraft. The article provides a comparative overview of sensors that determine the roll in different ways. *Materials and methods.* Special attention is paid to the IR roll sensor. The operating principle is described in detail. The influence of the optical window design on the IR sensor readings is described, the influence of the heating of the housing and surrounding gases on the thermocouple readings is estimated, and the influence of weather conditions and the underlying surface on the sensor operation is shown. *Conclusion.* It is concluded that IR sensors have a number of advantages in contrast to other types of sensors, and can be used to obtain data on the orientation of the aircraft.

Keywords: roll, IR sensor, MEMS thermocouple, aircraft, angular orientation

For citation: Drach V.E., Kondratov D.A., Shmelkova A.A. IR roll sensor for determination of an angular orientation of the aircraft. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):21–30. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-3

Введение

Крен – поворот объекта (судна, самолета, фундамента) вокруг его продольной оси. Один из трех углов (крен, тангаж и рыскание), соответствующих трем углам Эйлера, которые задают ориентацию аппарата относительно нормальной системы координат. Угол крена (угол наклона) обычно обозначается как γ [1].

Долгое время проблема ориентации летательных аппаратов решалась только с применением механических гироскопов – громоздких, тяжелых, трудоемких в изготовлении и

настройке устройств. Зачастую обеспечиваемое такими устройствами время выбега оказывается недостаточным для продолжительного полета.

Развитие микроэлектромеханической (МЭМС) технологии предоставило альтернативу в виде МЭМС-гироскопов. Их достоинства – сверхмалые габариты и вес, неограниченное время работы, отсутствие необходимости в настройке, простое подключение к системе управления. Однако MEMS-гироскопы в течение своей работы накапливают ошибку, которую необходимо периодически сбрасывать с помощью другого устройства.

Сброс такой ошибки ориентации требует получения информации об ориентации летательного аппарата способом, отличным от механического: магнитным, визуальным, оптическим или термометрическим.

Целью данной работы является определение влияния конструкции оптического окна на показания ИК датчиков, нагрева корпуса и окружающих газов на показания термопар, а также влияние погодных условий и подстилающей поверхности на работу датчика.

Обзор способов определения крена

В настоящее время выпускаются различные датчики определения угла крена, которые функционируют в соответствии с несколькими разными физическими принципами.

При использовании магнитного способа определения угла крена датчик измеряет проекцию индукции магнитного поля на ось чувствительности. Однако такому датчику свойственны два типа искажений: *hard-iron* и *soft-iron*. Первый тип искажений (*hard-iron*) – это аддитивный эффект, при котором к измеряемому полю добавляется постоянная составляющая [2]. Причиной такого искажения может быть, к примеру, собственное смещение нуля датчика или действие постоянного магнита. Второй тип искажений (*soft-iron*) – мультипликативный эффект, который отражает изменение направления и/или ослабление вектора магнитной индукции [3]. Этот эффект может быть вызван присутствием металлического предмета рядом с магнитометром или же собственными искажениями датчика – погрешностью масштабного коэффициента или перекосом его оси чувствительности. Вследствие вышеуказанных недостатков данный датчик, не обладая достаточной точностью, не представляет интереса в рассматриваемой задаче [4].

При визуальном способе ориентации используется анализ изображения с камеры, закрепленной на летательном аппарате, в ходе которого определяется наклон линии горизонта [5]. Такой способ позволяет ориентировать летательный аппарат с высокой точностью, однако требует мощной вычислительной системы, способной обрабатывать алгоритм в реальном времени. Такой способ лучше всего подходит для аппаратов, управляемых с земли, где обработка может проводиться на наземной станции по данным, полученным по каналу телеметрии (если позволяет его пропускная способность) [6]. В случае полностью автономного летательного аппарата размещение громоздкой вычислительной системы на борту крайне затруднительно.

В оптическом способе применяются лазерные датчики крена. В таком датчике используется квантовый генератор, в котором генерируются волны оптического диапазона, распространяющиеся в противоположных направлениях, и который снабжен устройством, осуществляющим измерение частоты возникающих биений указанных волн [7]. Однако недостатками такого типа датчиков являются нелинейность выходного сигнала вследствие явления захвата. Это явление возникает, когда частоты встречных волн различаются незначительно. Это приводит к тому, что при очень малой угловой скорости вращения лазерного датчика из-за взаимной синхронизации волн исчезают биения. Кроме того, в таких датчиках имеется зависимость масштабного коэффициента от линейных размеров датчика [8].

При термометрическом способе используется температурный контраст между направлениями надир и зенит, который возможно определить с помощью бесконтактных температурных датчиков, таких как термопары или пироприемники [9].

Описание принципа работы температурного датчика

Температурный датчик использует для своей работы постоянно имеющуюся разницу температуры Земли и тропосферы (небосвода). Небосвод и Земля являются источниками инфракрасного (ИК) излучения. Диапазон ИК-излучения для небосвода находится в пределах

6...14 мкм, а для Земли – 7,5...13,5 мкм, что примерно соответствует излучению абсолютно черного тела с температурой в диапазоне $-75...+75$ °С. Температура небосвода всегда меньше температуры Земли. В ясные солнечные дни температурное различие между зенитом небосвода и земной поверхностью может достигать 40 °С. Даже в облачные дни остается разница порядка 1...3 °С. Разница температур существует и для других погодных условий (табл. 1) [10].

Таблица 1

Температурная разница между зенитом небосвода и земной поверхностью

Погодные условия	Температура воздуха, °С	Разница температур земля/зенит, °С
Ясная зимняя ночь, нулевая облачность	-15	32
Солнечный зимний день, нулевая облачность	-10	20
Пасмурный зимний день, низкая снеговая облачность	-2	1,5
Пасмурный зимний день, туман, низкая облачность	0	1
Осенний солнечный день легкая облачность	+5	19
Солнечный летний день, нулевая облачность	+25	40

Температуру тел, являющихся источниками ИК-излучения, можно измерить с помощью инфракрасных термометров (пирометров) – МЭМС-термопар.

МЭМС-термопара представляет собой соединенные последовательно несколько десятков-сотен термопар, сформированных методом МЭМС-технологии на кремниевой подложке площадью 0,6...1,5 мм² и смонтированных в миниатюрный герметичный корпус с входным оптическим окном – фильтром на полосу 6...14 мкм [11]. Также прибор содержит встроенный термистор для измерения локальной температуры датчика. Постоянная времени датчика – не более 5...6 мс.

Работоспособность пирометров при любых погодных условиях обусловлена уникальным свойством земной атмосферы пропускать практически без ослабления ИК-излучение в диапазоне 6...14 мкм (рис. 1). В этом диапазоне находятся собственные тепловые излучения тел, включая космическое вещество. И в этом же диапазоне работают пирометры [12].

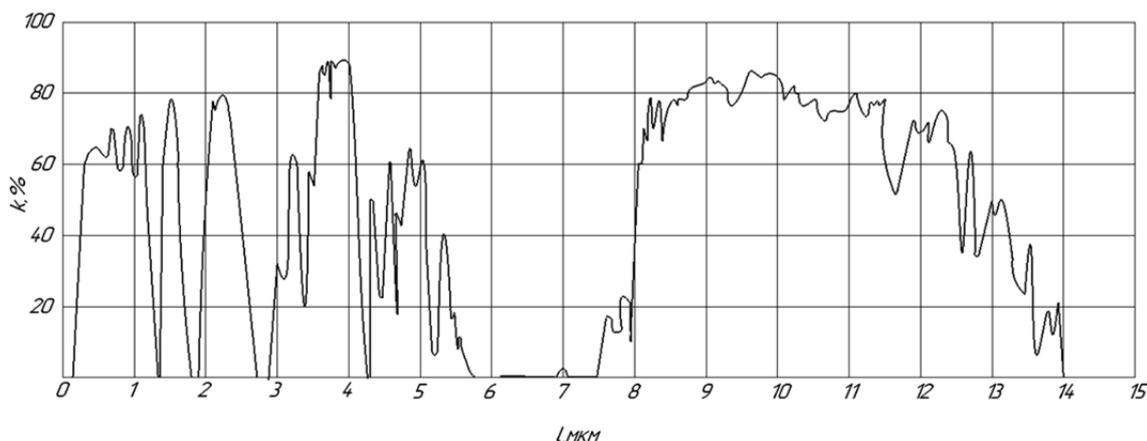


Рис. 1. Спектральное пропускание атмосферы: l – длина волны, k – пропускание

Это свойство атмосферы позволяет пирометрам фиксировать космический холод даже через плотные облака и измерять тепловой контраст между холодным небосводом и теплой Землей. Важно, что Солнце практически не излучает в этом диапазоне, поэтому оно невидимо для пирометров [13].

Рассмотрим принцип работы датчика (рис. 2). Термопара, имеющая поле зрения FOV, зафиксирована на аппарате. Экватор сферы представляет горизонт Земли, и аппарат может свободно вращаться в любом направлении относительно сферы. Угол между биссектрисой FOV и плоскостью горизонта – угол наклона (зенита) по отношению к горизонту γ_0 (где $0 \leq \gamma_0 \leq 2\pi$). Конус, представляющий угол зрения термопары, пересекается с единичной сферой, образуя круг S . Кроме того, биссектриса угла зрения образует азимутальный угол β_0 относительно l .

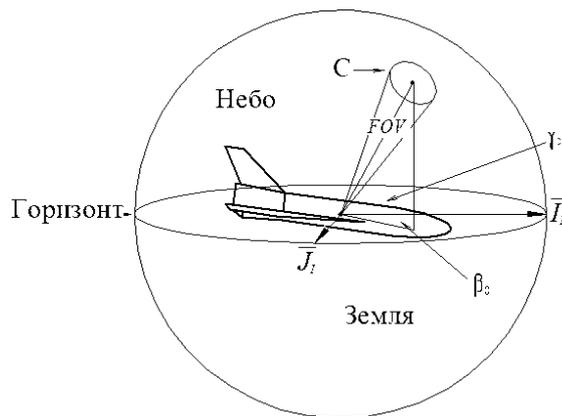


Рис. 2. Принцип работы датчика

Выходное напряжение термопары пропорционально общей ИК энергии, попадающей на датчик. Доказано, что ИК излучение в земной атмосфере минимально при угле зенита, соответствующем направлению точно вверх, и растет экспоненциально при движении угла зенита к нулю. Когда термопара направлена точно к Земле, сигнал максимальный. Общее ИК-излучение $y(\gamma)$ на каждом интервале угла зенита:

$$y(\gamma) = \begin{cases} k_1 e^{-\alpha\gamma} + k_2, & \text{если } 0 \leq \gamma \leq \pi/2, \\ k_1 e^{-\alpha(\pi/2-\gamma)} + k_2, & \text{если } \pi/2 \leq \gamma \leq \pi, \\ p_2 \gamma^2 + p_1 \gamma + p_0, & \text{если } \pi \leq \gamma \leq 2\pi, \end{cases} \quad (1)$$

где $k_1 = 59,0$; $k_2 = 6,0$; $\alpha = -11,0$; $p_0 = -55,0$; $p_1 = 57,3$ и $p_2 = -6,1$. Указанные коэффициенты определены экспериментально. Рисунок 3 показывает график величины ИК излучения как функции угла наклона к горизонту.

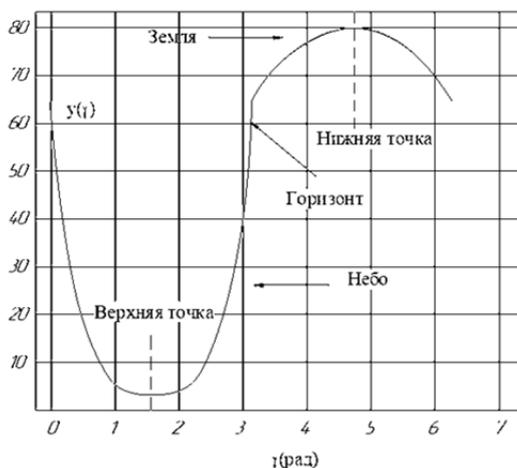


Рис. 3. Зависимость ИК-излучения (в относительных единицах) от угла наклона к горизонту

Выходное напряжение термопары пропорционально ИК излучению в круге C и может быть выражено как

$$V(\gamma) = k_v \iint_C y(\gamma) d\beta d\gamma. \quad (2)$$

Так как C круг, то

$$V(\gamma) = k_v \int_{\gamma_0 - FOV/2}^{\gamma_0 + FOV/2} 2y(\gamma) \sqrt{\left(\frac{FOV}{2}\right)^2 - (\gamma - \gamma_0)^2} d\gamma. \quad (3)$$

Ориентация аппарата, как правило, определяется с помощью стандартных углов, а именно: угла рыскания ψ , угла тангажа θ и угла крена ϕ . Углы крена и тангажа могут быть преобразованы в общий горизонтальный угол, используя следующее выражение:

$$\gamma_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\cos(\theta) \sin(\phi)}{\sqrt{\sin^2(\theta) \sin^2(\phi) + \cos^2(\phi)}} \right). \quad (4)$$

Зависимость выходного напряжения термопары с полем зрения 120° от угла крена, при равном нулю угле тангажа, приведена на рис. 4.

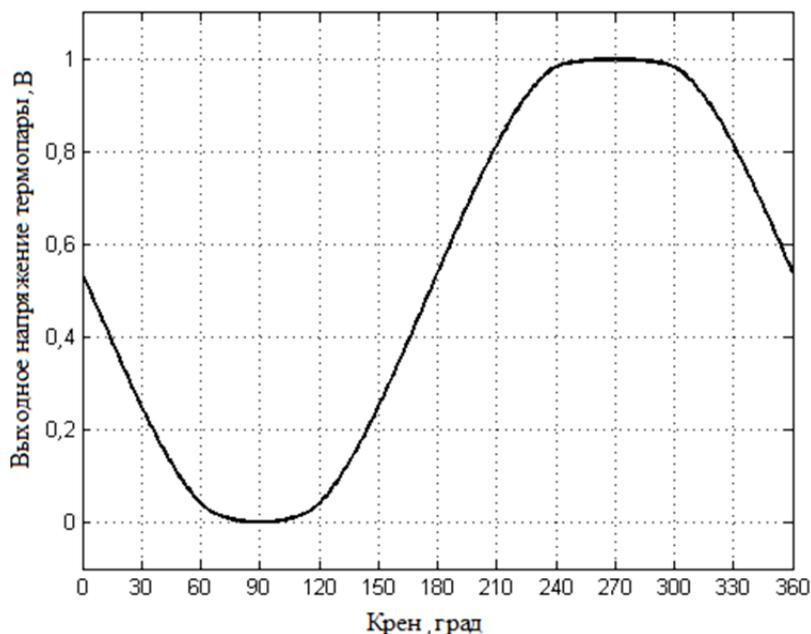


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения термопары от угла крена

Рисунок 5 описывает влияние апертуры термопары на ее выходное напряжение. Приведены зависимости для полей зрения от 90° до 150° с шагом 15° .

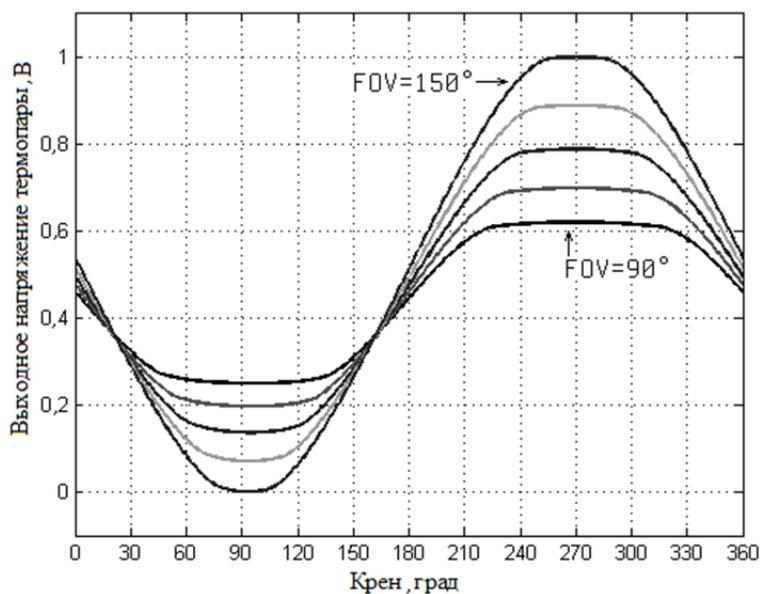


Рис. 5. Влияние апертуры термопары на выходной сигнал

Рисунок 6 описывает влияние угла тангажа на выходное напряжение термопары. Приведены зависимости для углов тангажа от 0° до 90° с шагом 15° . Как видно из графика, при угле тангажа, равном 90° , определение угла крена становится невозможным ввиду отсутствия теплового контраста.

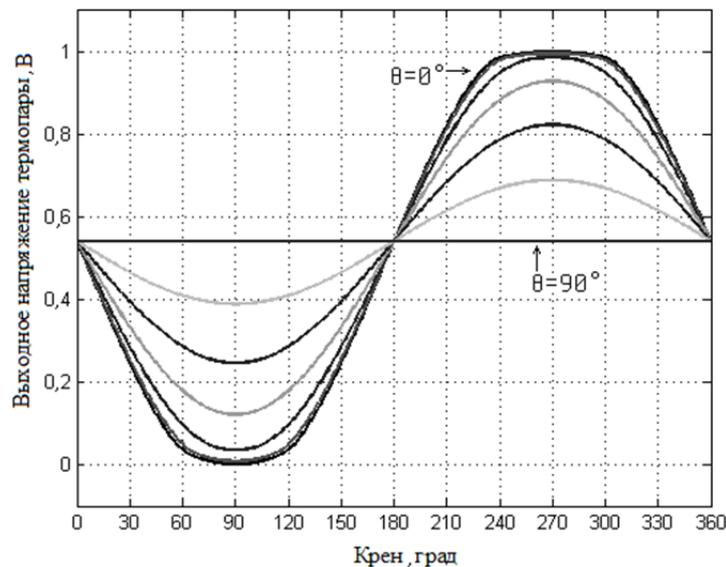


Рис. 6. Влияние угла тангажа на выход термопары

Влияние конструкции оптического окна на показания ИК датчиков

В ходе полета неизбежен нагрев входного оптического окна, которое в свою очередь начнет излучать на длине волны, близкой к длине волны принимаемого с поверхности Земли ИК-излучения. Ввиду того, что для выделения сигнала угла крена используется дифференциальный сигнал, если излучение оптического окна не будет ослеплять термопару, возникающая ошибка будет минимальной.

Для оценки возможности ослепления термопары сравним излучение Земли и излучение окна.

Землю можно считать абсолютно черным телом (АЧТ) с температурой $200...300$ К. Согласно закону Планка, мощность, приходящаяся на единицу площади излучающей поверхности в единичном интервале длин волн, определяется по формуле

$$R(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\frac{hc}{\lambda^2} e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (5)$$

При этом следует учитывать, что оптимальным рабочим диапазоном длин волн для термопары является диапазон $8...14$ мкм. Излучаемая поверхностью Земли мощность в этом случае составит

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\frac{hc}{\lambda^2} e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda, \quad (6)$$

где $\lambda_1 = 8$ мкм; $\lambda_2 = 14$ мкм.

Считаем, что температура корпуса во время полета нагревается до $T = 573$ К, и до той же температуры нагревается входное окно датчика. Материал входного окна считаем серым телом с коэффициентом черноты $e = 0,9$:

$$E = e \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\frac{hc}{\lambda^2} e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda. \quad (7)$$

**Оценка влияния нагрева корпуса летательного аппарата
и окружающих газов на показания терморпар**

На рис. 7 изображена зависимость принимаемого на единицу площади излучения Земли на высоте 4 км от температуры исходя из выражения (7).

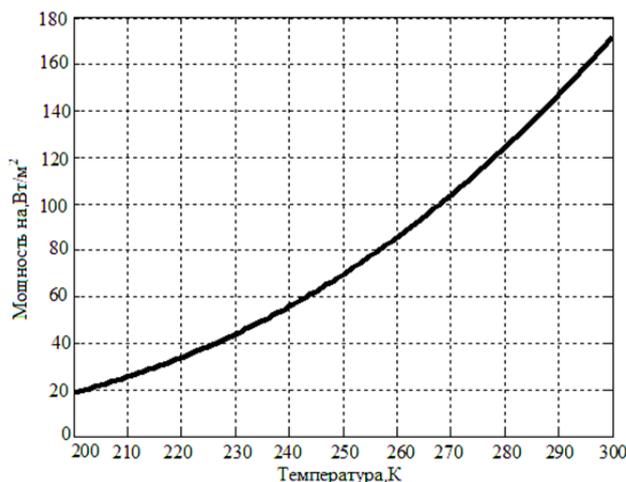


Рис. 7. Зависимость принимаемого на единицу площади излучения Земли (мощность на 1 м² при $h = 4$ км)

Считаем, что температура корпуса во время полета составляет 573 К, и до такой же температуры нагрето входное окно датчика. Материал окна считаем серым телом с коэффициентом черноты 0,9:

$$E = e \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda = 1538 \text{ Вт/м}^2. \quad (8)$$

Площадь входного окна считаем равной 1 см². Тогда полная мощность, излучаемая нагретым стеклом, равняется 0,15 Вт. Считаем, что терморпара находится на расстоянии 10 мм от окна. Тогда мощность, приходящаяся на единицу площади в месте расположения терморпары, равняется $0,15 / (2\pi l^2 + \pi r^2) = 4,8 \text{ Вт / м}^2$.

На рис. 8 представлены графики зависимости теплового излучения Земли и стекла по всему спектру. Земля считается абсолютно черным телом с температурой 300 К, а стекло серым телом с температурой 573 К и коэффициентом черноты 0,9. Как видно из представленного графика, чем больше нагрето тело, тем в более коротковолновую область смещается максимум мощности. Максимум теплового излучения Земли приходится на рабочий диапазон длин волн 8...14 мкм, в то время как максимум излучения стекла смещается в более коротковолновую область.

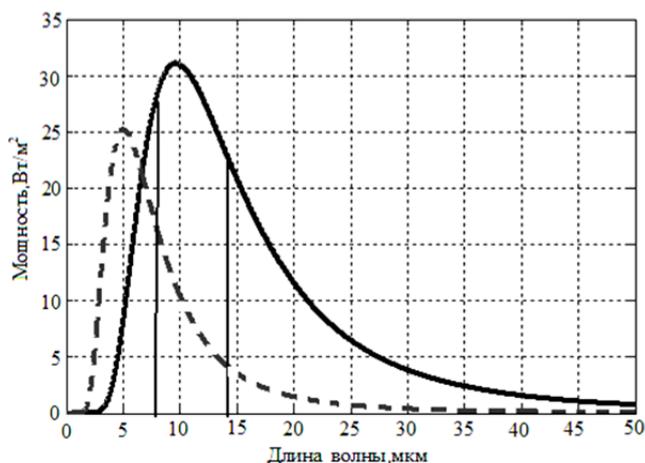


Рис. 8. Зависимость мощности излучения Земли и входного оптического окна во всем диапазоне длин волн (Земля – сплошная линия, стекло – пунктирная)

Основными источниками теплового излучения среди газов атмосферы являются углекислый газ и пары воды, но они в диапазоне длин волн 8...14 мкм не излучают. Можно дать грубую оценку, считая, что вся излученная энергия в температурном пограничном слое придется на рабочий диапазон длин волн. Толщина температурного пограничного слоя

$$\delta \approx 0,59 \text{Pr}^{-1/2} \frac{l}{\sqrt{\text{Re}}} \approx \frac{l}{\sqrt{\text{Re}}} \approx 10^{-4} \text{ м}, \quad (9)$$

$$E = e_{\Gamma} \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (10)$$

где $e_{\Gamma} = 1 - e^{-b_{\lambda} \rho l}$, $b_{\lambda} = 0,2$ в исследуемом диапазоне длин волн;

$$p_{\text{возд}} V = \frac{m_{\text{возд}}}{M_{\text{возд}}} RT, \quad (11)$$

$$p_{\text{CO}_2} V = \frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} RT. \quad (12)$$

Поделив одно на другое, получаем парциальное давление CO_2 , при учете, что $m_{\text{CO}_2} = 0,0004 m_{\text{возд}}$:

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{возд}}} \frac{M_{\text{возд}}}{M_{\text{CO}_2}} p_{\text{возд}}, \quad (13)$$

$$p_{\text{возд}} = \frac{\rho}{M} RT = 1,8 \cdot 10^5, \quad (14)$$

откуда $p_{\text{CO}_2} = 47,5 \text{ Па}$; $e_{\Gamma} = 0,037$; $E = 0,8 \text{ Вт / м}^2$.

Аналогично для паров воды: $E = 8,9 \text{ Вт / м}^2$. Стоит отметить, что полученные данные существенно завышены. Можно заключить, что нагрев корпуса изделия во время полета незначительно изменит показания термопар. Также следует упомянуть тот факт, что для определения отклонения поперечной оси от горизонта используется разность двух термопар, поэтому в том случае, если нагрев будет равномерным, то заметного влияния на показания прибора не окажет.

Влияние погодных условий и подстилающей поверхности

При полете на очень низкой высоте над наклонной подстилающей поверхностью летательный аппарат, корректируемый датчиком крена, отклоняется от горизонта в соответствии с наклоном подстилающей поверхности. Однако стоит отметить, что данный эффект не представляет опасности на данных высотах.

Также можно увидеть схожую ситуацию при работе датчика вблизи низких облаков: слоистых и кучевых. Этот эффект связан с тем, что такие облака гораздо менее прозрачны в ИК диапазоне, ввиду повышенной концентрации поглощающих газов и имеет место быть на высоте не более 2 км.

Заключение

В статье было показано, что ИК датчики крена обладают рядом преимуществ в отличие от других типов датчиков и характеризуются отсутствием влияния на их работу погодных условий, подстилающей поверхности и нагрева корпуса во время полета.

Данные датчики могут быть использованы в качестве дополнительного источника получения информации об ориентации летательного аппарата при сбросе ошибки ориентации MEMS-гироскопов, а также в качестве резервных систем ориентации летательного аппарата.

Благодаря своим малым размерам они хорошо подходят для установки на небольших летательных аппаратах, пилотируемых с земли или работающих в автономном режиме, что играет существенную роль в обеспечении их компактности и стоимости.

Список литературы

1. Трофимов А. А., Гладков А. В., Трофимова Н. С. [и др.]. Датчик угловых перемещений для газотурбинного двигателя // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 71–76.
2. Патент RU 0002629539 U1. Способ измерения магнитного курса подвижного объекта / Каплин А. Ю., Степанов М. Г. ; № 2016126041 ; заявл. 28.06.2016 ; опубл. 29.08.2017.
3. Трофимов А. А., Цыпин Б. В. Датчик угловых перемещений с цифровым выходом // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 4. С. 29–34.
4. Чье Е. У., Чернышов Е. С. Магнитно-инерциальный метод определения положения и ориентации объекта // Информатика вычислительная техника и управление. 2014. № 1. С. 69–78.
5. Степанов Д. Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер // Программные продукты и системы. 2014. № 1. С. 150–157.
6. Хекер П., Бестманн У., Волков С. Ю. [и др.]. Позиционирование летательного аппарата по видеоданным для контроля интегрированной навигационной системы при заходе на посадку // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 4. С. 29–51.
7. Патент RU 2406962 C2. Способ наведения вращающейся по углу крена ракеты, система наведения и позиционный датчик для его осуществления / Захаров Л. Г., Копылов Ю. Д., Кузнецов Ю. М. [и др.] ; № 2008122084/02А ; заявл. 02.06.2008 ; опубл. 20.12.2010.
8. Патент RU 2494932С1. Способ формирования оптической посадочной траектории летательного аппарата / Фещенко С. В. ; № 2012116850/11А ; заявл. 26.04.2012 ; опубл. 10.10.2013.
9. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М. : Мир, 1972. С. 535.
10. Egan G., Taylor B. Characterisation of infrared sensors for absolute unmanned aerial vehicle attitude determination // Technical report MECSE-2-2007. 2007. P. 1–7.
11. Трофимов А. А., Бастрыгин К. И. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 17–25.
12. Rogers J., Costello M. A low-cost orientation estimator for smart projectiles using magnetometers and thermopiles // Journal of The Institute of Navigation. 2012. № 59. P. 9–24.
13. Rogers J., Costello M., Hepner D. Roll orientation estimator for smart projectiles using thermopile sensors // Journal of Guidance and Dynamics. 2011. № 34. P. 688–697.

References

1. Trofimov A.A., Gladkov A.V., Trofimova N.S. [et al.]. Angular displacement sensor for gas turbine engine. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(2):71–76. (In Russ.)
2. Patent RU 0002629539 U1. Method of measuring the magnetic course of a moving object. Kaplin A.Yu., Stepanov M.G.; No. 2016126041; appl. 28.06.2016; publ. 29.08.2017. (In Russ.)
3. Trofimov A.A., Tsy-pin B.V. Angular displacement sensor with digital output. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2016;(4):29–34. (In Russ.)
4. Ch'e E.U., Chernyshov E.S. Magnetic-inertial method for determining the position and orientation of an object. *Informatika vychislitel'naya tekhnika i upravlenie = Informatics computer engineering and management.* 2014;(1):69–78. (In Russ.)
5. Stepanov D.N. Methods and algorithms for determining the position and orientation of an unmanned aerial vehicle using onboard video cameras. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems.* 2014;(1):150–157. (In Russ.)
6. Kheker P., Bestmann U., Volkov S. Yu. [et al.]. Positioning of an aircraft based on video data for monitoring an integrated navigation system during landing. *Giroskopiya i navigatsiya = Gyroscopy and navigation.* 2019;27(4):29–51. (In Russ.)
7. Patent RU 2406962 C2. The method of guidance of a rocket rotating in the angle of roll, a guidance system and a positional sensor for its implementation. Zakharov L.G., Kopylov Yu.D., Kuznetsov Yu.M. [et al.]; No. 2008122084/02A; appl. 02.06.2008; publ. 20.12.2010. (In Russ.)
8. Patent RU 2494932S1. A method for forming an optical landing trajectory of an aircraft. Feshchenko S.V.; No. 2012116850/11A; appl. 26.04.2012; publ. 10.10.2013. (In Russ.)
9. Khadson R. *Infrakrasnye sistemy = Infrared systems.* Moscow: Mir, 1972:535. (In Russ.)
10. Egan G., Taylor B. Characterisation of infrared sensors for absolute unmanned aerial vehicle attitude determination. *Technical report MECSE-2-2007.* 2007:1–7.
11. Trofimov A.A., Bastygin K.I. System of measurement, monitoring, control and diagnostics of rocket engine parameters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2017;(3):17–25. (In Russ.)

12. Rogers J., Costello M. A low-cost orientation estimator for smart projectiles using magnetometers and thermopiles. *Journal of The Institute of Navigation*. 2012;(59):9–24.
13. Rogers J., Costello M., Hepner D. Roll orientation estimator for smart projectiles using thermopile sensors. *Journal of Guidance and Dynamics*. 2011;(34):688–697.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Евгеньевич Драч

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных технологий,
Сочинский государственный университет
(Россия, г. Сочи, ул. Пластунская, 94)
E-mail: rpd-admin@inbox.ru

Vladimir E. Drach

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of information technology,
Sochi State University
(94 Plastunskaya street, Sochi, Russia)

Даниил Алексеевич Кондратов

магистрант,
Калужский филиал
Московского государственного технического
университета имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Калуга, ул. Баженова, 2)
E-mail: rpd-admin@inbox.ru

Daniil A. Kondratov

Master degree student,
Kaluga branch of the Bauman Moscow
State Technical University
(2 Bazhenova street, Kaluga, Russia)

Анастасия Альбертовна Шмелькова

магистрант,
Калужский филиал
Московского государственного технического
университета имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2.)
E-mail: rpd-admin@inbox.ru

Anastasiya A. Shmel'kova

Master degree student,
Kaluga branch of the Bauman Moscow
State Technical University
(2 Bazhenova street, Kaluga, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования / Revised 24.06.2021

Принята к публикации / Accepted 29.09.2021

УДК 621.3.032
doi:10.21685/2307-5538-2022-1-4

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЧАСТОТНЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОСТОВЫХ ТЕНЗОСХЕМ

М. С. Конкина

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
myzochka@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью исследования является расчет параметров схемы частотного интегрирующего развертывающего преобразователя (ЧИРП) для компенсации температурной погрешности, возникающей вследствие разброса параметров тензорезисторов и воздействия повышенной температуры. *Материалы и методы.* Применены классические методы физики полупроводников, полупроводниковой тензометрии и электрических цепей постоянного и переменного тока для расчета зависимости сопротивления полупроводникового тензорезистора от деформации и температуры и частоты напряжения на выходе ЧИРП. *Результаты.* Получено, что для минимизации аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности выходного сигнала ЧИРП целесообразно применить оригинальное конструкторское решение для мостовой схемы, заключающееся в использовании тензорезистора с характеристиками, идентичными характеристикам полупроводниковых тензорезисторов, что позволит снизить аддитивную погрешность выходного сигнала более чем на 7 %. *Выводы.* На основании проведенных расчетов сделан вывод, что данное конструкторское решение является оптимальным средством температурной компенсации при разбросе номиналов полупроводниковых тензорезисторов мостовой схемы ЧИРП с учетом технологических особенностей полупроводниковых тензорезисторов.

Ключевые слова: погрешность, полупроводниковый тензорезистор, мостовая схема, тензочувствительность, ЧИРП

Благодарности. Автор выражает особую благодарность к.т.н., доценту Волкову Вадиму Сергеевичу за ценные советы и значимые замечания при проведении исследования и оформления данной статьи.

Для цитирования: Конкина М. С. Компенсация погрешностей частотных интегрирующих развертывающих преобразователей на основе полупроводниковых мостовых тензосхем // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 31–37. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-4

ERROR COMPENSATION OF FREQUENCY INTEGRATING UNFOLDING CONVERTERS BASED ON SEMICONDUCTOR BRIDGE STRAIN CIRCUITS

M.S. Konkina

Penza State University, Penza, Russia
myzochka@list.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the study is to calculate the parameters of the circuit of a frequency integrating unfolding converter to compensate for the temperature error resulting from the spread of the parameters of strain gages and the effects of elevated temperature. *Materials and methods.* Classical methods of semiconductor physics, semiconductor strain gauge and DC and AC electrical circuits are applied to calculate the dependence of the resistance of a semiconductor strain gauge on deformation and temperature and frequency of the voltage at the output of the FIUC. *Results.* It is found that in order to minimize the additive and multiplicative components of the error of the FIUC output signal, it is advisable to apply an original design solution for the bridge circuit, which consists in using a strain gauge with characteristics identical to those of semiconductor strain gauges, which will reduce the additive error of the output signal by more than 7 %. *Conclusions.* Based on the calculations carried out, it is concluded that this design solution is the optimal means of temperature compensation when the values of semiconductor strain gages of the FIUC bridge circuit are scattered, taking into account the technological features of semiconductor strain gages.

Keywords: error, semiconductor strain gauge, bridge circuit, strain sensitivity, FIUC

Acknowledgements. The author expresses special gratitude to candidate of technical sciences, associate professor Vadim S. Volkov, for valuable advice and significant comments during the research and design of this article.

For citation: Konkina M.S. Error compensation of frequency integrating unfolding converters based on semiconductor bridge strain circuits. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):31–37. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-4

Введение

Современные условия эксплуатации датчиков для измерения механических величин предполагают высокие требования к точности и помехозащищенности измерительного сигнала. Широкое распространение получили датчики тензорезистивного типа вследствие обширной области применения, относительно простой конструкции и удобства схемной реализации измерительной цепи (ИЦ) [1–4]. Для повышения помехозащищенности и упрощения интеграции таких датчиков в цифровые информационно-измерительные системы применяется включение тензомостов в состав частотных интегрирующих и развертывающих преобразователей (ЧИРП), обладающих высокой помехоустойчивостью и простотой преобразования выходного сигнала, представляющего собой последовательность прямоугольных импульсов, частота следования которых пропорциональна изменению сопротивлений мостовой схемы, в цифровой код [4].

Известно, что погрешности технологического процесса при изготовлении полупроводниковых тензорезисторов приводят к возникновению отклонений их номинальных сопротивлений, а также температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и температурного коэффициента тензочувствительности (ТКЧ) от заданных значений и, как следствие, к начальному разбалансу мостовой схемы (МС), эквивалентному наличию ненулевого входного сигнала [2].

Большинство технических решений ЧИРП с мостовыми схемами содержат на входе мостовые измерительные схемы с металлическими тонкопленочными тензо- и терморезисторами, служащие для преобразования давления, действующего на упругий элемент в виде круглой жесткозашемленной мембраны, в электрическое напряжение, при этом выход мостовой схемы подключен к ЧИРП на основе операционных усилителей (рис. 1) [1]. Данным схемам присущ недостаток мостовых резистивных преобразователей в виде дополнительной температурной погрешности выходного сигнала, возникающей при эксплуатации преобразователей в области повышенных температур [1].

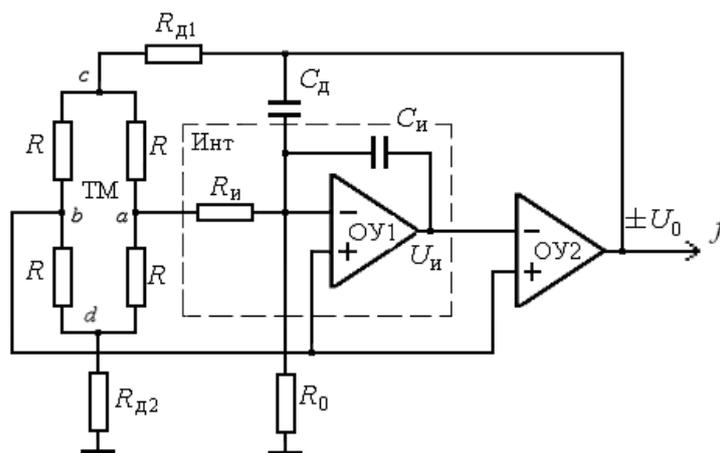


Рис. 1. Функциональная схема ЧИРП с мостовой тензорезистивной схемой [1]

Ранее решения данной проблемы были предложены преимущественно для МС с металлическими тонкопленочными тензо- и терморезисторами [3]. Однако при этом не учитывались особенности полупроводниковых тензорезисторов, имеющих значительный ТКС и сравнимый с ним по величине ТКЧ, что приводит к возникновению погрешности частоты следования импульсов на выходе ЧИРП, имеющей как аддитивную, так и мультипликативную составляющую [4].

Проведен расчет зависимости частоты от температуры и деформации с учетом разброса параметров по формуле (1) при изменении ΔT от 0 °C до 100 °C с шагом, равным 1 °C [4, 5, 9].

Расчет показал, что значения аналитической зависимости частоты от температуры и деформации с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов $f(\Delta T)$ в интервале от $2,9985 \cdot 10^3$ до $3,0027 \cdot 10^3$ Гц [4, 5, 8].

На основании полученных данных построен график аналитической зависимости частоты от температуры и деформации с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов [8], представленный на рис. 3.

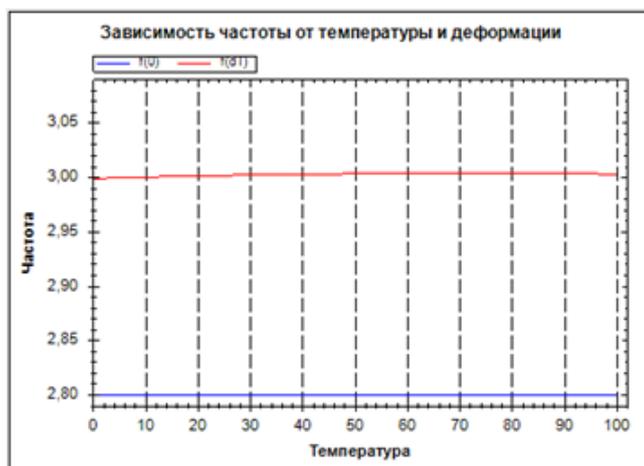


Рис. 3. График аналитической зависимости частоты от температуры и деформации с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов

Таким образом, на основе результатов вычислений [4, 5, 8] с учетом разбаланса МС ЧИРП и зависимости частоты от температуры определена погрешность выходного сигнала ЧИРП, которая составляет 12 %, что не соответствует требованиям по точности, предъявляемым к современным датчикам физических величин.

Результаты и обсуждение

Рассмотрена методика компенсации температурной погрешности для высокочувствительных полупроводниковых датчиков [7, 11], согласно которой оптимальным решением является последовательное включение в схему тензомоста полупроводникового терморезистора с отрицательной температурной характеристикой. Данная методика была уточнена применительно для МС ЧИРП на основе полупроводниковых тензорезисторов, где роль терморезистора выполняет резистор интегратора в схеме ЧИРП.

Проведены расчеты и моделирование для МС ЧИРП, у которой в качестве термозависимого резистора используется резистор интегратора R_i , выполненный по тому же технологическому процессу, что и тензорезисторы МС с номинальным значением $R_i = R_{i0}$, и ТКС, равным $\gamma = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Определены составляющие погрешности частоты выходного сигнала с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов при воздействии повышенной температуры ΔT , изменяющейся от 0 °C до 100 °C с шагом, равным 1 °C.

С учетом изменения температуры ΔT получены значения аддитивной составляющей погрешности выходного сигнала $\Delta_1 = 7,258 \%$ и мультипликативной составляющей погрешности выходного сигнала, равной $\Delta_0 = 0,157 \%$ [4, 5, 9].

Таким образом, сделан вывод [5], что, поскольку мультипликативная составляющая погрешности выходного сигнала менее 0,2 %, т.е. в 5 раз меньше, чем погрешность одного полупроводникового тензорезистора, погрешность частоты выходного сигнала является преимущественно аддитивной и составляет почти 8 %. Это вызвано разбросом номиналов полупроводниковых тензорезисторов, т.е. свидетельствует о несбалансированности тензомоста в начальный момент работы ЧИРП.

Исходя из критерия минимального значения температурной погрешности, произведем перерасчет значения ТКС при заданном начальном значении терморезистора R_i . Для обеспечения минимальной температурной погрешности задано начальное значение ТКС терморезистора R_i , равное ТКЧ полупроводниковых резисторов тензомоста при заданном начальном значении R_{i0} , чтобы определить оптимальное в данном случае значение ТКС.

На выходе получим оптимизированное значение $\gamma = 1,216 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ из расчета по формуле (1). Получив оптимизированное значение ТКС сопротивления интегратора, подставив данные в формулу (1), найдем оптимизированное номинальное значение сопротивления интегратора, равное $R_{i0} = 5,355 \cdot 10^4 \text{ Ом}$.

С учетом полученных оптимизированных значений ТКС сопротивления интегратора и номинального сопротивления интегратора, подставив значения в формулу (1), произведем перерасчет частоты выходного сигнала.

На рис. 4 представлен расчет составляющих погрешности выходного сигнала ЧИРП с учетом оптимизированных параметров резистора интегратора [10].

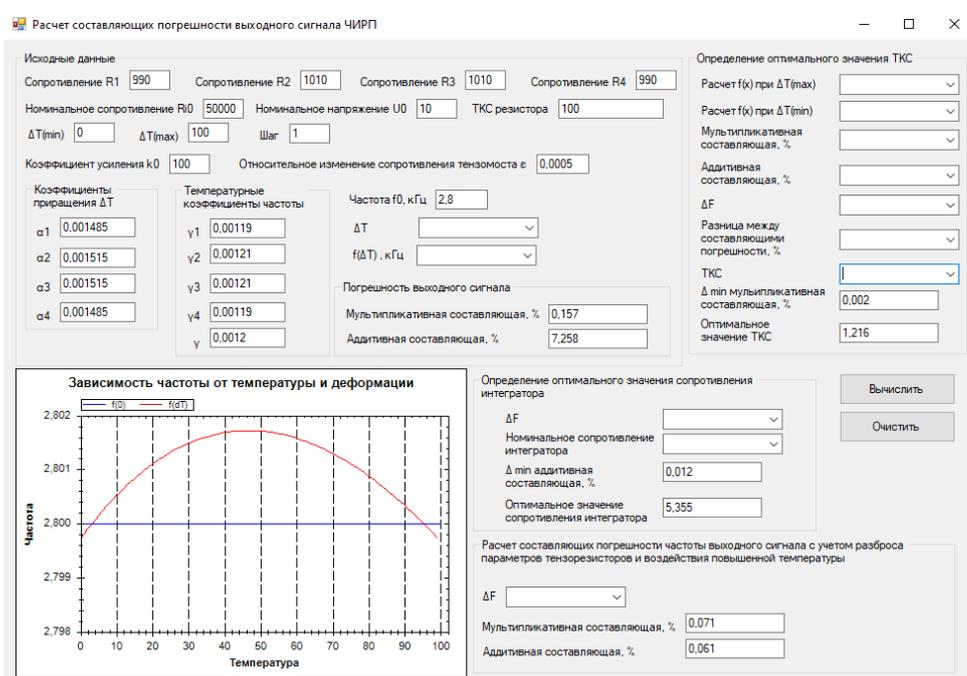


Рис. 4. Расчет составляющих погрешности выходного сигнала ЧИРП

С учетом изменения показателя ΔT и при оптимизированных значениях получим аддитивную составляющую погрешности выходного сигнала $\Delta_1 = 0,061 \text{ \%}$ и мультипликативную составляющую погрешности выходного сигнала, равную $\Delta_0 = 0,073 \text{ \%}$.

Заключение

Применение в составе ЧИРП мостового резистивного преобразователя полупроводникового резистора интегратора, имеющего температурные характеристики, идентичные характеристикам тензорезисторов, позволяет снизить аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности выходного сигнала до значений менее 0,1 %, что соответствует современным требованиям к датчикам физических величин.

Список литературы

1. Громков Н. В. Интегрирующие развертывающие преобразователи параметров датчиков систем измерения, контроля и управления : монография. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009. 244 с.
2. Волков В. С., Кудрявцева Д. А., Вергазов И. Р. Современные направления развития преобразователей давления с частотным выходным сигналом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4. С. 20–29.

3. Волков В. С., Конкина М. С. Анализ частотных преобразователей полупроводниковых резистивных датчиков для эксплуатации при повышенных температурах // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию образования кафедры «Автоматика и телемеханика» (г. Пенза, 22–23 мая 2019 г.) : в 2 т. / под ред. д.т.н., проф. М. А. Щербакова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. Т. 1. С. 121–123.
4. Volkov V. S., Konkina M. S. Modeling frequency integrating unfolding converter with a semiconductor strain gauge bridge taking into account temperature effect – APITECH-II – 2020 // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. Vol. 1679. P. 042066 (1-6). doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042066
5. Волков В. С., Волкова Н. В., Конкина М. С. Анализ возможностей применения полупроводниковых тензорезисторов для построения частотных интегрирующих развертывающих преобразователей механических величин в частоту // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 58–64. doi: 10.21685/2307-5538-2020-2-7
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021660207. Программный модуль для учета технологического разброса параметров тензорезисторов ЧИРП / Волков В. С., Конкина М. С. ; № 2021619087 ; заявл. 09.06.2021 ; опубл. 23.06.2021.
7. Волков В. С., Баринов И. Н., Евдокимов С. П. Температурная компенсация полупроводникового датчика давления с нелинейной температурной зависимостью характеристик // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4. С. 53–60.
8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021619809. Программный модуль для расчета аналитической зависимости частоты от температуры и деформации тензорезисторов ЧИРП с учетом разброса параметров / Волков В. С., Конкина М. С. ; № 2021619086 ; заявл. 09.06.2021 ; опубл. 17.06.2021.
9. Volkov V. S., Konkina M. S. Modeling frequency integrating unfolding converter operation taking into account technological variation in parameters. APITECH-II 2020 // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. Vol. 1679. P. 042081 (1-6). doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042081
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021660420. Программный модуль для расчета составляющих погрешности частоты выходного сигнала ЧИРП с учетом разброса параметров тензорезисторов и воздействия повышенной температуры / Волков В. С., Конкина М. С. ; № 2021619411 ; заявл. 09.06.2021 ; опубл. 25.06.2021.
11. Волков В. С., Баринов И. Н. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 1. С. 30–36.

References

1. Gromkov N.V. *Integriruyushchie razvertvyayushchie preobrazovateli parametrov datchikov sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya: monografiya = Integrating deploying converters of sensor parameters of measurement, control and control systems*. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2009:244. (In Russ.)
2. Volkov V.S., Kudryavtseva D.A., Vergazov I.R. Modern trends in the development of pressure transducers with a frequency output signal. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2014;(4):20–29. (In Russ.)
3. Volkov V.S., Konkina M.S. Analysis of frequency converters of semiconductor resistive sensors for operation at elevated temperatures. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh : sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 55-letiyu obrazovaniya kafedry «Avtomatika i telemekhanika» (g. Penza, 22–23 maya 2019 g.): v 2 t. = Problems of automation and control in technical systems : collection of articles based on materials of XXXIII International Scientific and Technical. conf., dedicated. 55th anniversary of the formation of the Department of Automation and Telemechanics (Penza, May 22–23 2019) : in 2 volumes*. Penza: Izd-vo PGU, 2019;1:121–123. (In Russ.)
4. Volkov V.S., Konkina M.S. Modeling frequency integrating unfolding converter with a semiconductor strain gauge bridge taking into account temperature effect – APITECH-II – 2020. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2020;1679:042066 (1-6). doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042066
5. Volkov V.S., Volkova N.V., Konkina M.S. Analysis of the possibilities of using semiconductor strain gages for constructing frequency integrating unfolding converters of mechanical quantities into frequency. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(2):58–64. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2020-2-7
6. Certificate of registration of the computer program RU 2021660207. A software module for accounting for the technological spread of the parameters of CHIRP strain gauges. Volkov V.S., Konkina M.S.; No. 2021619087; appl. 09.06.2021; publ. 23.06.2021. (In Russ.)
7. Volkov V.S., Barinov I.N., Evdokimov S.P. Temperature compensation of a semiconductor pressure sensor with a nonlinear temperature dependence of characteristics. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2013;(4):53–60. (In Russ.)

8. Certificate of registration of the computer program RU 2021619809. A software module for calculating the analytical dependence of frequency on temperature and strain of strain gages of CHIRP taking into account the spread of parameters. Volkov V.S., Konkina M.S.; No. 2021619086; appl. 09.06.2021; publ. 17.06.2021. (In Russ.)
9. Volkov V.S, Konkina M.S. Modeling frequency integrating unfolding converter operation taking into account technological variation in parameters. APITECH-II 2020. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2020;1679:042081(1-6). doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/0 42081
10. Certificate of registration of the computer program RU 2021660420. A software module for calculating the error components of the CHIRP output signal frequency, taking into account the spread of strain gauge parameters and the effects of elevated temperature. Volkov V.S., Konkina M.S.; No. 2021619411; appl. 09.06.2021; publ. 25.06.2021. (In Russ.)
11. Volkov V.S., Barinov I.N. Compensation of temperature error of sensitivity of high-temperature semiconductor pressure sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2013;(1):30–36. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Мария Сергеевна Конкина

преподаватель кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: myzochka@list.ru

Mariya S. Konkina

Lecturer of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 623.4:621.3.083.7

doi:10.21685/2307-5538-2022-1-5

ПРИМЕНЕНИЕ ВРЕЯИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ДАТЧИКАХ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

А. В. Захаров¹, И. В. Либкинд², Л. Е. Шахмейстер³

^{1,2} АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод, Калуга, Россия

³ АО «НПО «Луч», Новосибирск, Россия

^{1,2,3} l.e.shahmejster@onegroup.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Учет температуры объекта автономными информационными и управляющими системами повышает точность их работы. Используемые чувствительные элементы для измерения температуры имеют аналоговый выход (напряжение), требующий преобразования в вид, пригодный для цифровой обработки. В этой связи возникает задача выбора чувствительного элемента и определения наиболее простого и точного метода преобразования его сигнала. *Материалы и методы.* Рассмотрены различные методы аналого-цифрового преобразования выходных сигналов полупроводникового термочувствительного элемента. *Результаты.* Предложено для построения датчика температуры использование времяимпульсного преобразования напряжения чувствительного элемента, основанного на температурной зависимости разности напряжений эмиттерных переходов двух транзисторов с разной плотностью эмиттерного тока. *Вывод.* Теоретически и экспериментально подтверждена возможность использования в автономных измерительных и управляющих системах датчиков температуры с полупроводниковым термочувствительным элементом и времяимпульсным преобразователем двойного интегрирования с фиксированными значениями пределов интегрирования. Показано, что упрощение датчика осуществляется за счет исключения из его состава датчика опорного временного интервала, а высокая точность времяимпульсного преобразования достигается отсутствием влияния нестабильности параметров интегратора на результаты измерения.

Ключевые слова: датчик температуры, полупроводниковый чувствительный элемент, времяимпульсное преобразование

Для цитирования: Захаров А. В., Либкинд И. В., Шахмейстер Л. Е. Применение времяимпульсного преобразования в датчиках температуры с полупроводниковым чувствительным элементом // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 38–46. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-5

APPLICATION OF TIME-PULSE CONVERSION IN TEMPERATURE SENSORS WITH SEMICONDUCTOR SENSITIVE ELEMENT

A.V. Zakharov¹, I.V. Libkind², L.E. Shakhmeyster³

^{1,2} JSC «Voskhod» – Kaluga Radio Tube Plant, Kaluga, Russia

³ JSC «NPO «Luch», Novosibirsk, Russia

^{1,2,3} l.e.shahmejster@onegroup.ru

Abstract. *Background.* Taking into account the temperature of the object by autonomous information and control systems increases the accuracy of their work. The temperature sensors used have an analog output (voltage), which requires conversion to a form suitable for digital processing. In this regard, there is a problem of selecting a sensitive ele-

ment and determining the simplest and most accurate method of converting its signal. *Materials and methods*. Various methods of analog-to-digital conversion of the output signals of a semiconductor thermosensitive element are considered. *Conclusions*. The possibility of using temperature sensors with a semiconductor thermosensitive element and a time-pulse converter of double integration with fixed values of the integration limits in autonomous measuring and control systems has been theoretically and experimentally confirmed. It is shown that the sensor is simplified by excluding the reference time interval from its composition, and the high accuracy of the time-pulse conversion is achieved by the absence of the influence of the instability of the integrator parameters on the measurement results.

Keywords: temperature sensor, semiconductor sensing element, pulse-time conversion

For citation: Zakharov A.V., Libkind I.V., Shakhmeyster L.E. Application of time-pulse conversion in temperature sensors with semiconductor sensitive element. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022;(1):38–46. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-5

В настоящее время в автономных информационных и управляющих системах (АИУС) актуальным является учет различных факторов, влияющих на точность их работы. Одним из таких существенных факторов является температура объекта управления, содержащего в частности пиротехнические узлы, параметры которых в значительной степени определяются температурой [1]. Измерение температуры может осуществляться датчиком, включаемым в состав АИУС.

Для измерения температуры нашли применение самые разнообразные датчики, в качестве чувствительных элементов которых используются металлическая проволока (медная, платиновая), терморезисторы, полупроводниковые элементы, термопары и др. [2–4]. Информация о значении температуры в этих чувствительных элементах представляется в виде аналогового сигнала (напряжения, сопротивления и др.). Возможно также для измерения температуры применение кварцевых термочувствительных резонаторов, например типа РКТ206 ТУ25-1862.0013-88, выпускаемых ООО «СКТБ ЭлПА» [5]. Информацией о температуре в этих резонаторах является изменение частоты относительно исходного значения. Достоинством использования для измерения температуры кварцевыми термочувствительными резонаторами является возможность цифровой обработки информации без дополнительных преобразователей. Использование этих резонаторов в АИУС требует дополнительного изучения стабильности их характеристик в течение длительного срока хранения и обеспечения устойчивости к внешним механическим нагрузкам.

В ряде случаев для построения датчика температуры используют свойство $p-n$ -перехода, заключающееся в том, что падение напряжения на нем линейно зависит от его температуры [2]. Температурный коэффициент напряжения (ТКН) $p-n$ -перехода отрицателен и имеет типовое значение 2 мВ/°С. Недостатком $p-n$ -перехода как датчика температуры является довольно большое дифференциальное сопротивление (25...30 Ом при токе 1 мА). По этой причине для достижения приемлемых характеристик датчика $p-n$ -переход необходимо питать от стабилизатора тока. Кроме того, у диодов не нормированы ни сам ТКН, ни его стабильность, что затрудняет их применение в качестве термодатчиков.

Хорошими характеристиками обладают чувствительные элементы полупроводниковых датчиков температуры типа LM 135 фирмы ST Microelectronics [6] и отечественный типа 1019ЧЕ2АС [7], выпускаемый АО «Восход» – КРЛЗ.

Работа этих чувствительных элементов основана на зависимости от температуры разности значений напряжения на эмиттерном переходе $U_{БЭ}$ двух транзисторов с разной плотностью эмиттерного тока [2]. Эта разность $U_{БЭ}$ при заданном соотношении значений площади эмиттера транзисторов и равном токе через них (это и обеспечивает разную плотность тока) оказывается пропорциональной абсолютной температуре кристалла:

$$U_{БЭ} = \frac{kT^{\circ}K}{q} \ln M,$$

где k – постоянная Больцмана; $T^{\circ}K$ – температура в градусах Кельвина; M – отношение площадей эмиттеров транзисторов чувствительного элемента; q – заряд электрона.

С точки зрения схемотехники эти чувствительные элементы представляют собой двух-выводной стабилитрон, напряжение стабилизации которого имеет температурный коэффициент

ент 10 мВ/°С. Информацией об измеряемой температуре в этих датчиках является аналоговый сигнал – напряжение, для дальнейшей обработки информации требующий преобразования в сигнал, пригодный для цифровой обработки. Необходимое преобразование сигнала может осуществляться с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). В настоящее время нашли применения самые разнообразные АЦП [8]. Последовательные, параллельные или последовательно-параллельные АЦП осуществляют преобразование мгновенных значений напряжения $U_{\text{вх}}$ в цифровую форму в соответствии с выражением

$$N = 2^n \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{оп}}}, U_{\text{вх}} = \frac{N}{2^n} U_{\text{оп}},$$

где N – двоичный код, соответствующий преобразуемому входному напряжению $U_{\text{вх}}$; n – разрядность двоичного кода.

Для обеспечения высокой точности необходимо усреднение получаемой информации по результатам некоторого количества преобразований.

В АЦП с времяимпульсным преобразованием [8] осуществляется преобразование измеряемого напряжения $U_{\text{вх}}$ во временной интервал t . Для этого используется генератор пилообразного напряжения с напряжением, изменяющимся от максимального значения до нулевого (минимального).

Выходной временной интервал t соответствует временному интервалу между фиксируемым компаратором моментом равенства входного напряжения пилообразному напряжению и моментом равенства пилообразного напряжения нулевому значению.

При времяимпульсном преобразовании реализуется зависимость:

$$t = \frac{U_{\text{вх}}}{k}, U_{\text{вх}} = k t,$$

где k – крутизна выходного сигнала генератора пилообразного напряжения.

Недостатком этого АЦП является необходимость формирования пилообразного напряжения с обеспечением высокой точности его крутизны. Кроме того, так же, как и в предшествующем АЦП, требуется усреднение получаемого результата по ряду последовательных преобразований.

АЦП с двухэтапным интегрированием также относятся к АЦП с времяимпульсным преобразованием. На первом этапе осуществляется интегрирование входного сигнала $U_{\text{вх}}$ в течение фиксированного временного интервала t_1 . До интегрирования выходное напряжение интегратора равно начальному, например нулевому, значению. На втором этапе осуществляется интегрирование опорного напряжения $U_{\text{оп}}$, полярность которого противоположна полярности напряжения входного сигнала. Время интегрирования на втором этапе равно t_2 . Второй этап интегрирования заканчивается при начальном значении напряжения на выходе интегратора.

Двухэтапное интегрирование позволяет снизить требования по точности компаратора и интегратора, в частности его постоянной интегрирования.

Если параметры интегрирования входного $U_{\text{вх}}$ и опорного $U_{\text{оп}}$ напряжений одинаковы, то рассматриваемое преобразование осуществляется в соответствии с выражением

$$t_2 = t_1 \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{оп}}}, U_{\text{вх}} = U_{\text{оп}} \frac{t_2}{t_1} U_{\text{эт}}.$$

Достоинством рассмотренного АЦП является получение информации не о мгновенном, а о среднем за время интегрирования t_1 значении входного напряжения. Недостатком этого преобразователя является необходимость включения в его состав формирователя временного интервала t_1 при интегрировании входного напряжения $U_{\text{вх}}$. Устранить этот недостаток можно, внося изменения в известный АЦП [8]. Изменения заключаются в интегрировании входного напряжения $U_{\text{вх}}$ не в течение фиксированного времени t_1 , а в течение времени изменения напряжения на выходе интегратора от одного до другого пороговых напряжений.

На рис. 1 приведена функциональная схема датчика температуры с времяимпульсным выходом, использующая полупроводниковый чувствительный элемент 1019ЧЕ2АС [7] и АЦП с двухэтапным интегрированием и фиксированным значением пределов интегрирования.

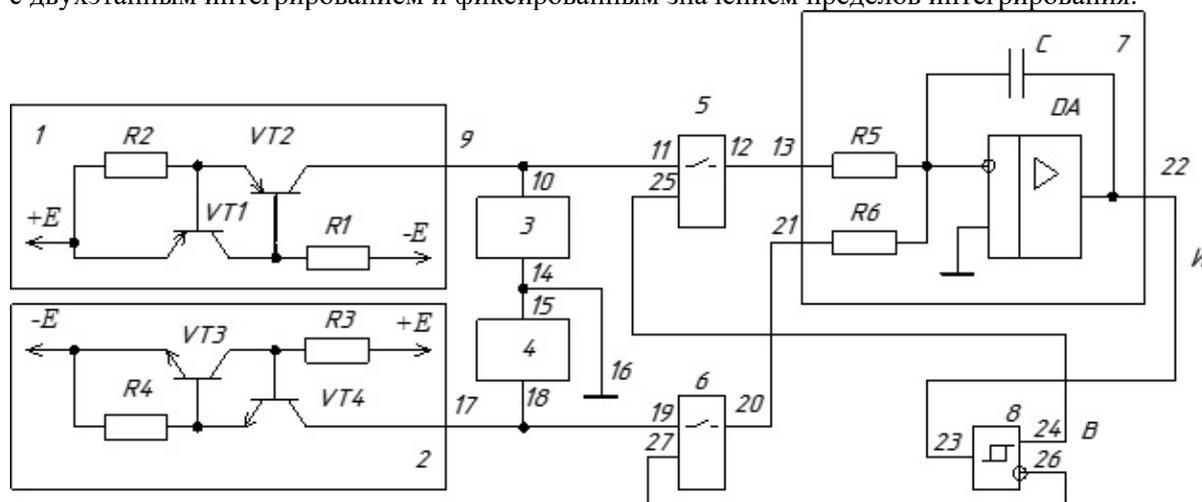


Рис. 1. Функциональная схема датчика температуры с импульсным выходом

Датчик температур состоит из двух токозадающих цепей 1, 2, термочувствительного элемента 3 и источника опорного напряжения 4, двух ключей 5, 6, интегратора 7 и триггера Шмитта 8. Питание токозадающих цепей 1, 2 осуществляется от источника питания $+E$, $-E$. Циклограмма сигналов, иллюстрирующая работу датчика температуры, приведена на рис. 2.

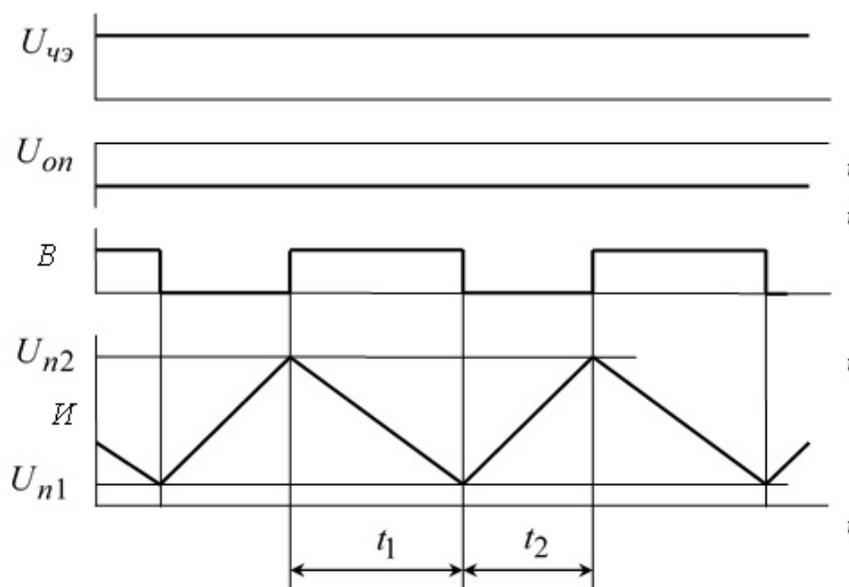


Рис. 2. Циклограмма сигналов датчика температуры:

$U_{чз}$ – напряжение на выводе 10 термочувствительного элемента 3; $U_{оп}$ – напряжение на выводе 18 источника опорного напряжения 4; B – напряжение на выводе 24 триггера Шмитта 8; I – напряжение на выходе 22 интегратора 7

Пусть на выходе 22 интегратора 7 (обозначено I на рис. 1, 2) присутствует напряжение, соответствующее сигналу логической «1» на выходе 24 (обозначено B на рис. 1, 2) и сигналу логического «0» на инверсном выходе 26 триггера Шмитта 8. Сигналы с выходов 24, 26 триггера Шмитта 8, поступая на управляющие входы 25, 27 ключей 5, 6, открывают ключ 5 и закрывают ключ 6. При этом напряжение $U_{чз}$ с выхода 10 термочувствительного элемента 3 через ключ 5 поступает на первый вход 13 интегратора 7. Напряжение на выходе 22 (циклограмма I рис. 2) интегратора уменьшается. Когда это напряжение достигнет нижнего порога

$U_{п1}$ срабатывания триггера Шмитта 8, он переключается и сигналы на его выходах 24 (циклограмма *B* рис. 2) и 26 изменяются на противоположные, что приводит к закрытию ключа 5 и открытию ключа 6. Подача напряжения $U_{чз}$ на первый вход 13 интегратора 7 прекращается. Ко второму входу 21 интегратора 7 через замкнутый ключ 6 подключается опорное напряжение $U_{оп}$. Полярность опорного напряжения относительно общей шины противоположна полярности напряжения чувствительного элемента. Напряжение на выходе 22 (циклограмма *И* рис. 2) интегратора увеличивается. Когда это напряжение достигнет верхнего порога переключения $U_{п2}$ триггера Шмитта 8, он вернется в исходное состояние. Далее процессы повторяются.

Напряжение $U_{чз}$ на выводах 10, 14 чувствительного элемента 3 зависит от температуры в соответствии с зависимостью

$$U_{чз} = U_{см} + \alpha T,$$

где $U_{см}$ – напряжение смещения характеристики термочувствительного элемента, соответствующее выходному напряжению термочувствительного элемента при нулевой температуре; T – измеряемая температура; α – температурный коэффициент термочувствительного элемента.

Если температура измеряется в градусах Кельвина и в качестве чувствительного элемента взята микросхема К1019ЧЕ2ХС [7], то $U_{см} = 0$.

Измеряемая температура равна

$$T = \frac{U_{чз}}{\alpha} - \frac{U_{см}}{\alpha}.$$

Значение $\frac{U_{см}}{\alpha}$ соответствует температуре смещения $T_{см}$ характеристики термочувствительного элемента, т.е.

$$T_{см} = \frac{U_{см}}{\alpha}.$$

Используя это, выражение для измеряемой температуры примет вид

$$T = \frac{U_{чз}}{\alpha} - T_{см}.$$

Интегрирование напряжения $U_{чз}$ чувствительного элемента 3 с его вывода 10 описывается выражениями

$$U_{п1} = U_{п2} - \frac{1}{\tau_1} \int_0^{t_1} U_{чз} dt, \quad U_{п2} - U_{п1} = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{t_1} U_{чз} dt = \frac{U_{чз} t_1}{\tau_1},$$

где τ_1 – постоянная интегрирования интегратора 7 по первому входу 13; t_1 – время интегрирования выходного напряжения чувствительного элемента, равное длительности сигнала логической «1» на выходе 24 триггера 8.

При интегрировании напряжения $U_{оп}$ с вывода 18 источника опорного напряжения 4 выходное напряжение интегратора 7 определяется выражением

$$U_{п2} = U_{п1} + \frac{1}{\tau_2} \int_0^{t_2} U_{оп} dt, \quad U_{п2} - U_{п1} = \frac{1}{\tau_2} \int_0^{t_2} U_{оп} dt = \frac{U_{оп} t_2}{\tau_2},$$

где τ_2 – постоянная интегрирования интегратора 7 по второму входу 21; t_2 – время интегрирования выходного напряжения источника опорного напряжения, равное длительности сигнала логического «0» на выходе 24 триггера 8.

Тогда $\frac{U_{\text{чз}} t_1}{\tau_1} = \frac{U_{\text{оп}} t_2}{\tau_2}$, откуда $U_{\text{чз}} = U_{\text{оп}} \frac{\tau_1 t_2}{\tau_2 t_1}$.

Подставляя полученное значение в выражение для измеряемой температуры, имеем

$$T = \frac{U_{\text{оп}} \tau_1 t_2}{\alpha \tau_2 t_1} - T_{\text{см}}.$$

Измеряемая температура определяется отношением длительностей логических «0» и «1» выходного сигнала триггера Шмитта δ .

В качестве токозадающих цепей 1, 2 могут быть использованы резисторы или стабилизаторы тока. В частности, построение токозадающих цепей на стабилизаторах тока показано на схеме рис. 1. Токозадающая цепь 1 построена на транзисторах $VT1$, $VT2$ и резисторах $R1$, $R2$, а токозадающая цепь 2 на транзисторах $VT3$, $VT4$ и резисторах $R3$, $R4$.

Интегратор 7 может быть построен на операционном усилителе DA , резисторах $R5$, $R6$ и конденсаторе C . Это показано на рис. 1. В этом случае

$$\tau_1 = R5 \cdot C, \quad \tau_2 = R6 \cdot C.$$

Отношение $\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{R5}{R6}$ от емкости конденсатора C интегратора не зависит, что показывает

на отсутствие влияния нестабильности емкости конденсатора C интегратора 7 на точность измерения температуры.

Как видно из приведенного выражения для температуры, результаты измерения температуры также не зависят и от пороговых напряжений $U_{\text{п1}}$, $U_{\text{п2}}$ триггера Шмитта δ и, следовательно, их нестабильность не вызывает погрешности измерения.

Отсутствие влияния нестабильности пороговых напряжений триггера Шмитта и емкости интегратора обеспечивает высокую точность измерений.

Значение $\frac{U_{\text{оп}} \tau_1}{\alpha \tau_2}$ определяется параметрами схемы датчика и является масштабным коэффициентом P :

$$P = \frac{U_{\text{оп}} \tau_1}{\alpha \tau_2}.$$

Тогда

$$T = P \frac{t_2}{t_1} - T_{\text{см}}.$$

При представлении результатов измерения в градусах Кельвина $T_{\text{см}}(^{\circ}K)$ и $U_{\text{см}} = 0$, $T_{\text{см}}(^{\circ}K) = 0$, $T(^{\circ}K) = P \frac{t_2}{t_1}$.

В частном случае, при $U_{\text{см}} \neq 0$, значение опорного напряжения может быть взято равным $U_{\text{оп}} = U_{\text{см}} \frac{\tau_2}{\tau_1}$. Тогда $K = \frac{U_{\text{см}}}{\alpha} = T_{\text{см}}$ и выражение для измеряемой температуры примет вид

$$T = T_{\text{см}} \left(\frac{t_2}{t_1} - 1 \right).$$

Если результат измерения необходимо представить в градусах Цельсия $T^{\circ}C$, а в качестве термочувствительного элемента используется микросхема 1019ЧТ2АС, у которой $T_{\text{см}} = 273^{\circ}C$, то значение измеренной температуры определяется выражением

$$T \text{ } ^\circ\text{C} = 273 \left(\frac{t_2}{t_1} - 1 \right).$$

Информация об измеренном значении температуры подается на микроконтроллер АИУС, который осуществляет измерение длительностей логических «0» и «1» выходных импульсов датчика и осуществляет вычисление температуры по приведенной формуле.

Чувствительный элемент датчика может быть выносным и закрепляется непосредственно в точке, температура которой подлежит измерению.

На рис. 3 приведены гистограммы распределения абсолютной погрешности d измерения температуры датчиком, выпускаемым АО «Восход» – КРЛЗ, для трех температур: нормальной, 50 °С и минус 50 °С.

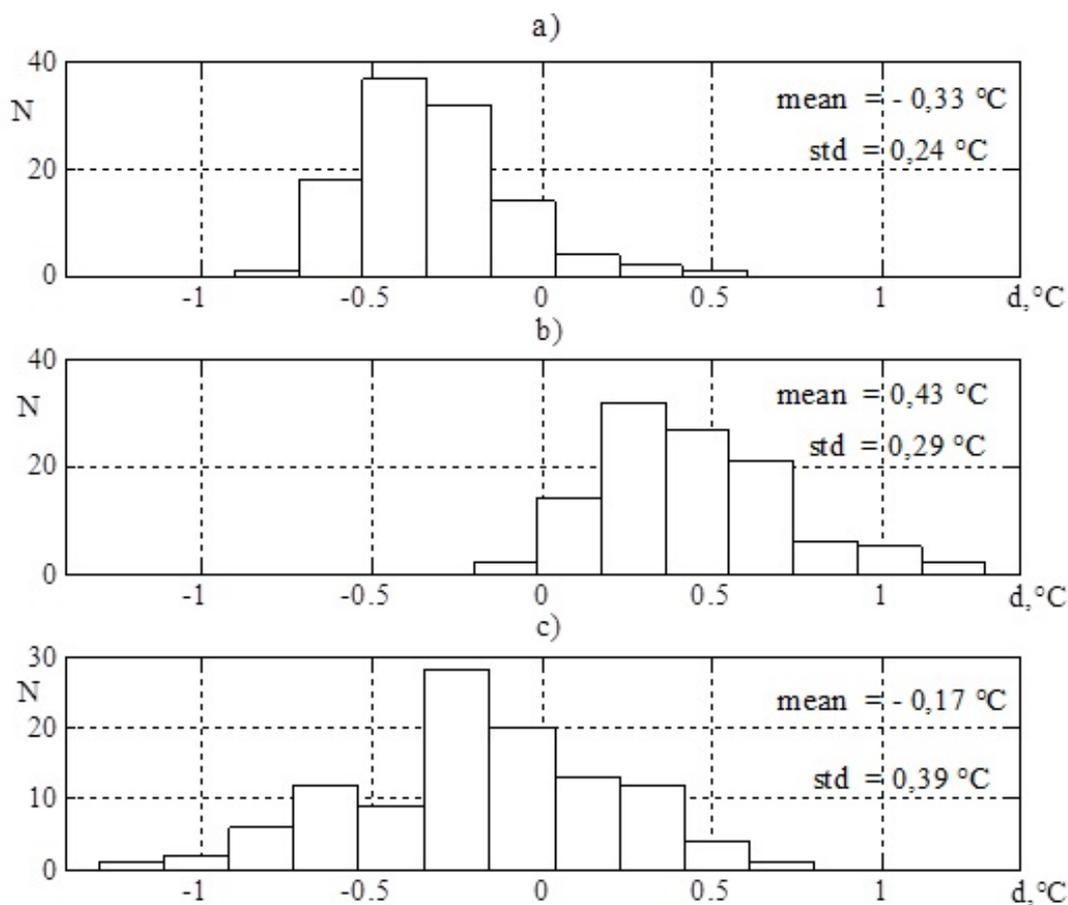


Рис. 3. Гистограмма погрешности d измерения температуры:
 а – нормальная температура; б – температура 50 °С; с – температура минус 50 °С

Гистограммы построены по результатам 100 измерений.
 Результирующие параметры измерений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результирующие параметры измерений датчика производства АО «Восход» – КРЛЗ

Измеряемая температура, °С	Предельные значения погрешности измерения, d , °С	Математическое ожидание погрешности измерения, mean, °С	Среднеквадратическое значение погрешности измерения, std , °С
20	-0,8; 0,6	-0,33	0,24
50	-0,2; 0,8	0,43	0,29
-50	-1,6; 0,7	-0,17	0,39

Из данных гистограммы рис. 3 и табл. 1 следует, что погрешность измерения температуры датчиком производства АО «Восход» – КРЛЗ в диапазоне температур ± 50 °С лежит в пределах $-1,6...0,8$ °С, математическое ожидание погрешности лежит в пределах $-0,33...0,43$ °С, среднеквадратическое значение погрешности не превышает $0,39$ °С.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность применения для АИУС систем датчика температур, включающего в свой состав полупроводниковый термочувствительный элемент и времяимпульсный АЦП двойного интегрирования с фиксированными значениями пределов интегрирования. Высокая точность датчика температур обусловлена отсутствием влияний нестабильности компараторов АЦП, определяющих пределы интегрирования, а также емкости конденсатора интегратора.

Упрощение датчика и его высокая точность определяются заменой времяимпульсного АЦП двойного интегрирования с интегрированием входного сигнала в течение фиксированного времени на АЦП с интегрированием в фиксированных пределах. Это дало возможность исключить из состава датчика формирователь временного интервала.

Дальнейшее повышение точности измерения температуры возможно внесением в энергонезависимую память данных микроконтроллера АИУС индивидуальных параметров датчика температур, в частности, температуры смещения $T_{см}$ и масштабного коэффициента P . В этом случае вполне реальным будет снижение погрешности измерений до $\pm 0,5$ °С.

Возможно также введение дополнительной калибровки путем подключения к АЦП источника с эталонным напряжением, равным выходному напряжению термочувствительного элемента при какой-то фиксированной температуре, например минус 50 °С. Включая попеременно калибровку и измерение, по полученным значениям отношений длительностей логического «0» и «1» можно определить значение температуры с уточненным при калибровке температурным коэффициентом термочувствительного элемента α и масштабного коэффициента P .

Список литературы

1. Гуров С. В. Реактивные системы залпового огня / под общ. ред. акад. РАН, д.т.н., проф. А. Н. Макаровца. Тула : Пересвет, 2006. 432 с.
2. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М., 2020. 592 с. URL: <https://www.elec.ru/library/info/frajden-sovremennye-datchiki>
3. Датчики : справ. пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. М. : Техносфера, 2012. 624 с.
4. Гордов А. Н. Основы температурных измерений. М. : Энергоатомиздат, 1992. 304 с.
5. Резонатор кварцевый термочувствительный. РКТ206 ТУ25-1862.0013-88. URL: <http://sktbelpa.ru/ru/products/termo/49-rkt.html>
6. Precision temperature sensors. LM135-LM235-LM335. 2008. 16 с. URL: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/lm335.pdf>
7. Чувствительный элемент датчика температуры с выходным напряжением, соответствующим абсолютной температуре в Кельвинах. Микросхемы интегральные К1019ЧЕ2АС, К1019ЧЕ2БС, К1019ЧЕ2ВС. Технические условия АДБК.431320.793 ТУ. АО «Восход» – КРЛЗ. 2010. 35 с.
8. Никамин В. А. Аналого-цифровые преобразователи : справочник. СПб. : КОРОНА принт ; М. : Альтекс-А, 2012. 224 с.

References

1. Gurov S.V. *Reaktivnye sistemy zalpovogo ognya = Multiple launch rocket systems*. Tula: Peresvet, 2006: 432. (In Russ.)
2. Frayden Dzh. *Sovremennye datchiki. Spravochnik = Modern sensors. Handbook*. Moscow, 2020:592. (In Russ.). Available at: <https://www.elec.ru/library/info/frajden-sovremennye-datchiki>
3. Sharapov V.M., Polishchuk E.S. (eds.). *Datchiki: sprav. posobie = Sensors : a reference manual*. Moscow: Tekhnosfera, 2012:624. (In Russ.)
4. Gordov A.N. *Osnovy temperaturnykh izmereniy = Fundamentals of temperature measurements*. Moscow: Energoatomizdat, 1992:304. (In Russ.)
5. Quartz thermosensitive resonator. RCT206 TU25-1862.0013-88. (In Russ.). Available at: <http://sktbelpa.ru/ru/products/termo/49-rkt.html>
6. *Precision temperature sensors. LM135-LM235-LM335*. 2008:16. (In Russ.). Available at: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/lm335.pdf>

7. A temperature sensor sensor with an output voltage corresponding to the absolute temperature in Kelvins. Integrated circuits K1019CHE2AS, K1019CHE2BS, K1019CHE2VS. Technical conditions of ADBC.431320.793 TU. JSC "Voskhod" – KRLZ. 2010:35. (In Russ.)
8. Nikamin V.A. *Analogo-tsifrovye preobrazovateli: spravochnik = Analog-to-digital converters : a handbook*. Saint Petersburg: KORONA print; Moscow: Al'teks-A, 2012:224. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Вячеславович Захаров

начальник отдела,
АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод
(Россия, г. Калуга, Грабцевское шоссе, 43)
E-mail: l.e.shahmejster@onegroup.ru

Anton V. Zakharov

Head of department,
JSC "Voskhod" – Kaluga Radio Tube Plant
(43 Grabtsevskoe highway, Kaluga, Russia)

Илья Владимирович Либкинд

технический директор
АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод
(Россия, г. Калуга, Грабцевское шоссе, 43)
E-mail: l.e.shahmejster@onegroup.ru

Ilya V. Libkind

Technical director,
JSC "Voskhod" – Kaluga Radio Tube Plant
(43 Grabtsevskoe highway, Kaluga, Russia)

Леонид Ефимович Шахмейстер

доктор технических наук,
начальник СКБ,
АО «НПО «Луч»
(Россия, г. Новосибирск, Станционная ул., 32)
E-mail: l.e.shahmejster@onegroup.ru

Leonid E. Shakhmeister

Doctor of technical sciences,
head of the SKB,
JSC "NPO "Luch"
(32 Stantsionnaya street, Novosibirsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СООТВЕТСТВИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ИСПЫТАНИЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ. СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

И. В. Чащин¹, О. А. Ширямов², А. В. Колосова³, А. В. Протасова⁴

^{1,2,3,4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
^{1,2,3,4} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время отсутствует единая система метрологических требований к программным средствам, используемым при испытаниях военной техники. *Материалы и методы.* Рассматриваются проблемные вопросы подтверждения соответствия программных средств испытаний военной техники метрологическим требованиям. *Результаты и выводы.* Предложены пути устранения существующих недостатков и формирования соответствующей системы подтверждения соответствия программных средств, используемых при испытаниях военной техники в рамках Минобороны России.

Ключевые слова: программные средства испытаний, подтверждение соответствия, метрологические требования, испытательное оборудование

Для цитирования: Чащин И. В., Ширямов О. А., Колосова А. В., Протасова А. В. Подтверждение соответствия программных средств испытаний военной техники метрологическим требованиям. Состояние, перспективы развития // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 47–55. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-6

CONFIRMATION OF THE COMPLIANCE OF THE SOFTWARE FOR TESTING MILITARY EQUIPMENT WITH METROLOGICAL REQUIREMENTS. STATE, DEVELOPMENT PROSPECTS

I.V. Chashchin¹, O.A. Shiryamov², A.V. Kolosova³, A.V. Protasova⁴

^{1,2,3,4} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia
^{1,2,3,4} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* Currently, there is no unified system of metrological requirements for software used in testing military equipment. *Materials and methods.* The article discusses the problematic issues of confirming the compliance of military equipment testing software with metrological requirements. *Results and conclusions.* The ways of eliminating the existing shortcomings and forming an appropriate system for confirming the conformity of software tools used in testing military equipment within the framework of the Russian Ministry of Defense are proposed.

Keywords: test software, confirmation of conformity, metrological requirements, test equipment

For citation: Chashchin I.V., Shiryamov O.A., Kolosova A.V., Protasova A.V. Confirmation of the compliance of the software for testing military equipment with metrological requirements. State, development prospects. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):47–55. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-6

Введение

Обеспечение единства и точности измерений при создании образцов военной техники, включая стадию испытаний, является важной научной и практической задачей, стоящей перед военными метрологами и метрологами оборонно-промышленного комплекса.

Основными направлениями развития организационной основы метрологического обеспечения военной техники, вытекающими из законодательства Российской Федерации об обеспечении единства измерений и нормативных правовых актов в области обороны и безопасности государства, являются [1]:

– приведение действующих нормативных и методических метрологических документов в соответствие с новым метрологическим законодательством, гармонизация документов заказчиков и исполнителей государственного оборонного заказа;

– построение и совершенствование единой метрологической системы, обеспечивающей необходимый уровень качества измерений при создании и эксплуатации военной техники, выработка и реализация единой военно-технической политики по развитию методов и средств их метрологического обеспечения.

При испытаниях сложных образцов военной техники для сокращения объемов, сроков и стоимости натурных испытаний применяется компьютерное моделирование [2, 3]¹. Специализированные программные средства, применяемые для компьютерного моделирования, должны имитировать условия испытаний в заданных диапазонах значений внешних и внутренних влияющих параметров с требуемой точностью. В настоящее время отсутствуют нормативные документы, регламентирующие метрологические требования к таким программным средствам и методики подтверждения выполнения этих требований, а также требование обязательного подтверждения соответствия таких программных средств.

В статье проводится анализ нормативных документов, на основе результатов которого сформированы предложения по формированию системы подтверждения соответствия метрологических характеристик программных средств испытаний требованиям законодательства по обеспечению единства измерений в области обороны и безопасности государства.

Терминология в области подтверждения соответствия программных средств испытаний военной техники метрологическим требованиям

Термины и их определения являются важнейшим элементом методологии военно-научных исследований и решения прикладных военно-технических проблем. Основной целью работ по совершенствованию понятийного аппарата является формирование устойчивой системы понятий, основанной на возможно меньшем числе независимых исходных понятий. Необходимо построить полную и непротиворечивую систему понятий, соответствующую актуальному состоянию предметной области [4, 5].

В области испытаний и контроля качества продукции основным терминологическим стандартом уже долгие годы является ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения»². Основные положения данного стандарта соответствуют и современным требованиям. Большинство стандартов в области контроля качества продукции, испытаний, подтверждения соответствия, сертификации, аттестации и т.д. используют терминологию, представленную в данном ГОСТе.

С развитием и широким использованием компьютерных технологий назрела необходимость внесения отдельных уточнений и дополнений в этот ГОСТ.

В соответствии с ГОСТ 16504-81, испытания – экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий. Необходимо обратить внимание на то, что в процесс испытаний было включено и моделирование как самого объекта испытания, так и воздействующих факторов.

Испытания с использованием моделей включают проведение расчетов на математических моделях объектов испытаний и (или) воздействий на него в сочетании с натурными испытаниями объекта и его составных частей (опытно-теоретический метод испытаний), а также применение физических моделей объекта испытаний или его составных частей. Данные натурных испытаний необходимы в качестве исходных данных для моделирования, а также используются для проверки правильности функционирования объекта испытаний.

Средство испытаний – техническое устройство (вещество) и (или) материал для проведения испытаний. В данное понятие не включены программные средства, математические,

¹ ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения.

² ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

информационные, имитационные, компьютерные модели, которые применяются при проведении испытаний.

Программное средство – объект, состоящий из программ, процедур, правил, а также, если предусмотрено, сопутствующих их документации и данных, относящихся к функционированию системы обработки информации. Термин «программное средство» включает в себя как частный случай объем понятия «программное обеспечение»¹.

Исходя из положений ГОСТ 16504-81, ГОСТ 28806-90 и сложившейся практики, программные средства (программы, программное обеспечение и т.д.), используемые при испытаниях, целесообразно отнести к средствам испытаний.

Предлагается расширить понятие «средство испытаний» и его определение изложить в следующей редакции: средство испытаний – техническое устройство (вещество), программное средство и (или) материал для проведения испытаний. Это позволит распространить требования, предъявляемые к средствам испытаний и на программные средства, используемые при испытаниях.

Под аттестацией испытательного оборудования понимается определение нормированных точностных характеристик испытательного оборудования, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установление пригодности этого оборудования к эксплуатации².

Предлагается дополнительно ввести термин – «аттестация программных средств испытаний» со следующим определением: аттестация программных средств испытаний – определение нормированных точностных характеристик программных средств испытаний, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установление пригодности этого программных средств к эксплуатации.

Также необходимо терминологию дополнить терминами «валидация программных средств испытаний» и «верификация программных средств испытаний»:

– верификация программных средств испытаний – процесс определения соответствия программных средств испытаний математической модели. Верификация обеспечивает обоснование того, что программное средство испытаний при определенных параметрах рассчитывает математическую модель правильно и с соответствующей точностью;

– валидация программных средств испытаний – процесс определения соответствия программных средств испытаний реальному миру. Валидация обеспечивает обоснование того, что программное средство испытаний в заявленной области применения позволяет правильно и с определенной точностью моделировать реальные процессы.

К воспроизведению условий испытаний и к результатам испытаний предъявляются требования по точности. Программные средства, применяемые для испытаний, должны имитировать условия испытаний в заданных диапазонах влияющих параметров с требуемой точностью и гарантировать качество испытаний. Следовательно, и к программным средствам испытаний необходимо предъявлять метрологические требования.

Под метрологическими требованиями к программным средствам испытаний понимаются требования к влияющим на результат и показатели точности программных средств испытаний, а также к условиям, при которых эти характеристики (параметры) должны быть обеспечены.

Под метрологической характеристикой программного средства испытаний предлагается понимать характеристику одного из свойств программного средства испытаний, влияющего на результат и показатели точности испытаний.

Требования нормативных документов к подтверждению соответствия программных средств испытаний военной техники метрологическим требованиям

Подтверждение соответствия – документальное удостоверение соответствия продукции или иных объектов, процессов проектирования (включая изыскания), производства, строи-

¹ ГОСТ 28806-90. Качество программных средств. Термины и определения.

² ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

тельства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг требованиям технических регламентов, документам по стандартизации или условиям договоров¹.

Формы подтверждения соответствия приведены на рис. 1, а структура нормативной базы – на рис. 2.

Особенности оценивания соответствия военной техники регламентируются Положением об особенностях оценки соответствия оборонной продукции (работ, услуг), поставляемой по государственному оборонному заказу, процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения указанной продукции, которое утверждено постановлением Правительства РФ от 11 октября 2012 г. № 1036².



Рис. 1. Формы подтверждения соответствия



Рис. 2. Нормативная база сертификации

¹ О техническом регулировании : федер. закон № 184-ФЗ от 27.12.2002.

² Об особенностях оценки соответствия оборонной продукции (работ, услуг), поставляемой по государственному оборонному заказу, процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения указанной продукции : постановление Правительства РФ № 1036 от 11 октября 2012 г.

Особенностями оценивания соответствия военной техники являются:

- установление государственными заказчиками оборонного заказа обязательных требований, форм и правил оценки соответствия, обеспечивающих пригодность и готовность военной техники к эффективному применению (использованию) в соответствии с назначением в той мере, в которой это необходимо для нужд обороны страны и безопасности государства;
- приоритетное и гарантированное выполнение головным исполнителем (исполнителем) оборонного заказа обязательных требований государственного заказчика (заказчика);
- обязательное применение и исполнение документов в области стандартизации оборонной продукции (работ, услуг);
- особенности аккредитации органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров), выполняющих работы по оценке соответствия военной техники.

Оценивание соответствия военной техники осуществляется в формах: государственного контроля (надзора); испытаний; измерений; контроля качества; проверки; приемки (государственной приемки); разрешения на ввод в эксплуатацию объекта, строительство которого закончено; разрешения на применение; экспертизы; подтверждения соответствия; в иных формах, определяемых государственными заказчиками¹.

Формы оценивания соответствия военной техники должны быть установлены в государственном контракте (договоре) с учетом суммарного риска недостоверной оценки соответствия и вреда при создании и применении военной техники в мирное время, а также ее технической сложности и значимости для нужд обороны страны и безопасности государства.

Правила оценивания соответствия регламентируются документами в области стандартизации оборонной продукции и (или) технической документацией. Перечень указанных документов, применяемых для оценивания соответствия, должен быть включен в государственный контракт (договор).

В табл. 1 приведены основные действующие нормативные документы, требования которых могут быть распространены на программные средства испытаний военной техники.

Таблица 1

Нормативные документы, регламентирующие требования к подтверждению соответствия программных средств испытаний военной техники

Группа требований	Нормативный документ
Требования к испытательному оборудованию	Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», ГОСТ 16504-81, ГОСТ Р 8.568-2017, ГОСТ РВ 0008–001-2013, ГОСТ РВ 0008–002-2013, ГОСТ РВ 0015–002
Требования к программным средствам	Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», ГОСТ 19781-90, ГОСТ 28195-99, ГОСТ 28806-90, ГОСТ Р 8.654-2015, ГОСТ Р 51189-98, ГОСТ Р 51904-2002, ГОСТ Р 56569-2015, ГОСТ Р 56713-2015, ГОСТ Р56920-2016, ГОСТ Р 57412-2017, ГОСТ Р 57700.1-2017, ГОСТ Р 57700.2-2017, ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000, ГОСТ Р ИСО МЭК 9126-93, ГОСТ РВ 0019-001-2006, ГОСТ РВ 51717-2001, ГОСТ РВ 51719-2001 и др.
Требования к моделированию	ГОСТ Р 57188-2016, ГОСТ Р 57412-2017, ГОСТ Р 57700.1-2017, ГОСТ Р 57700.2-2017 и др.
Требования к метрологическим характеристикам	Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», ГОСТ Р 8.654-2015, ГОСТ РВ 0008-001-2013, МИ 1317-86 и др.

Единство измерений в организациях и на предприятиях должно обеспечиваться проведением ряда мероприятий, включая аттестацию испытательного оборудования. Аттестация испытательного оборудования регламентируется ГОСТ Р 8.568, ГОСТ РВ 0008 – 002, а также другими действующими нормами и правилами в области метрологического обеспечения².

¹ Указ. соч.

² ГОСТ РВ 0008-001-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение единства измерений при выполнении государственного оборонного заказа. Общие требования к организации и порядку проведения метрологических работ. ; ГОСТ РВ 0015–002-2011 СРПП. Система менеджмента качества. Общие требования.

В соответствии с ГОСТ 0008-002-2013 и ГОСТ Р 8.568-2017 основной целью аттестации испытательного оборудования является подтверждение характеристик испытательного оборудования и возможности воспроизведения условий испытаний в заданных пределах с допускаемыми отклонениями, а также установление годности использования испытательного оборудования для испытаний оборонной продукции с целью оценки ее соответствия требованиям, установленным в технической документации¹.

В процессе аттестации необходимо определить диапазоны воспроизводимых испытательным оборудованием условий (режимов испытаний, нагрузок и т.д.) и фактические значения погрешностей их задания в соответствии с назначением данного испытательного оборудования и заданных условиях испытаний.

Программные средства испытаний военной техники испытательным оборудованием не являются и требования вышеуказанных ГОСТов на них не распространяются.

Оценка качества программного средства – совокупность операций, включающих выбор номенклатуры показателей качества оцениваемого программного средства, определение значений этих показателей и сравнение их с базовыми значениями² [15].

Выбор номенклатуры показателей качества для конкретного программного средства должен проводиться с учетом его назначения и требований области использования.

Общие положения испытаний программных средств изложены в ГОСТ РВ 51719-2001. Испытания проводят с целью оценки соответствия ее количественных и качественных характеристик заданным требованиям. Испытания программных средств осуществляют в процессе сертификации, аттестации, оценивании качества на всех стадиях жизненного цикла. Номенклатура показателей качества и характеризующие свойства программных средств установлены в ГОСТах³. В указанных стандартах отсутствуют требования к метрологическим характеристикам программных средств.

Оценивание соответствия установленным требованиям программного обеспечения измерений, не являющегося составной частью средств измерений, должно осуществляться в форме его аттестации в порядке, установленном Минпромторгом России, а для средств измерений военного назначения – соответствующими федеральным органом исполнительной власти, выполняющими функции государственного заказчика⁴.

Программные средства испытаний военной техники не являются программным обеспечением средств измерений и требования ГОСТ Р 8.654-2015 на такие программные средства не распространяются⁵.

Требования к компьютерным моделям, разрабатываемым на стадиях жизненного цикла изделия, должны устанавливаться в технических заданиях согласно ГОСТам⁶. Форму представления и порядок проверки, согласования и утверждения компьютерной модели для каждой стадии разработки и этапа выполняемых работ должен определять разработчик, если иное не установлено в техническом задании. Для компьютерных моделей изделий, разрабатываемых по государственному оборонному заказу, это решение должно быть согласовано с заказчиком (военным представительством) в соответствии с действующими нормативными документами.

¹ ГОСТ РВ 0008-002-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции. Организация и порядок проведения. ; ГОСТ Р 8.568-2017. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.

² ГОСТ 28195-99. Оценка качества программных средств. Общие положения.

³ ГОСТ РВ 51719-2001. Испытания программной продукции. Общие положения.

⁴ ГОСТ 28806-90. Качество программных средств. Термины и определения. ; ГОСТ 28195-99. Оценка качества программных средств. Общие положения. ; ГОСТ Р ИСО МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению.

⁵ ГОСТ РВ 0008-001-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение единства измерений при выполнении государственного оборонного заказа. Общие требования к организации и порядку проведения метрологических работ.

⁶ ГОСТ Р 8.654-2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения.

Общие положения сертификации программного обеспечения компьютерного моделирования, применяемого на различных стадиях жизненного цикла продукции, определены в ГОСТ Р 57700.2-2017¹. Сертификация программного обеспечения компьютерного моделирования по данному ГОСТу является формой добровольного подтверждения соответствия согласно статье 21². Порядок использования сертифицированного программного обеспечения компьютерного моделирования для подтверждения характеристик продукции устанавливается в нормативных документах организации, применяющей программное обеспечение компьютерного моделирования.

В соответствии с действующим законодательством программные средства испытаний военной техники не подлежат обязательному подтверждению соответствия, так как испытательным оборудованием не являются и не относятся к программному обеспечению средств измерений. Кроме того, в соответствии с ГОСТ РВ 0008-001-2013, федеральным законом № 102-ФЗ от 26.06.2008 процедура аттестации по отношению к программным средствам измерений не предусмотрена.

Документы, регламентирующие формы, порядок и правила задания метрологических требований и подтверждения соответствия программных средств испытаний военной техники, не разработаны.

Система подтверждения соответствия программных средств испытаний военной техники метрологическим требованиям

В настоящее время в Минобороны России отсутствуют требования к метрологическим характеристикам программных средств испытаний военной техники и система подтверждения соответствия таких программных средств.

В современных условиях в целях обеспечения единства измерений в сфере обеспечения обороны и безопасности государства при проведении испытаний военной техники с использованием программных средств испытаний необходимо:

1. Сформировать систему подтверждения соответствия программных средств испытаний метрологическим требованиям.
2. Уточнить и разработать ряд нормативных документов Минобороны России, определяющих метрологические требования к программным средствам испытаний, моделям, процедуре подтверждения соответствия программных средств испытаний.
3. Сформировать фонд программных средств испытаний военной техники, прошедших все необходимые процедуры подтверждения соответствия метрологическим требованиям.
4. Предусмотреть при выполнении государственного оборонного заказа обязательность применения только программных средств испытаний военной техники с подтвержденными метрологическими характеристиками.
5. Обеспечить доступ всем заинтересованным участникам процесса создания образцов военной техники к программным средствам испытаний военной техники, прошедшим процедуру подтверждения соответствия метрологическим требованиям.

Для подтверждения соответствия программных средств испытаний военной техники необходимо сформировать соответствующую структуру, в которую должны входить организации Минобороны России, проводящие работы в области испытаний, метрологического обеспечения, сопровождения разработки и производства военной техники.

Для формирования фонда документов по стандартизации в области программных средств испытаний военной техники необходимо:

- внести дополнения и изменения в ГОСТ 16504-81 в части учета особенностей испытаний с использованием моделей и программных средств испытаний;

¹ ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. ; ГОСТ Р 15.201-2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство.

² ГОСТ Р 57700.2-2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения.

- разработать ГОСТ РВ Программные средства испытаний военной техники. Термины и определения;
- разработать ГОСТ РВ Программные средства испытаний военной техники. Метрологические требования;
- разработать ГОСТ РВ Программные средства испытаний военной техники. Порядок и методики подтверждения соответствия программных средств испытаний военной техники.

Кроме того, необходимо рассмотреть вопрос разработки военных стандартов, регламентирующих метрологические требования к программным средствам испытаний различных видов военной техники с учетом особенностей их разработки, производства, применения, утилизации и т.д.

Заключение

Современная военная техника постоянно усложняется, растет количество составных частей, узлов, агрегатов и т.д., объединяемых сложными связями. Для испытаний сложных образцов военной техники создаются программные средства испытаний, которые должны учитывать характеристики рассматриваемых объектов и условия их функционирования. В таких программных средствах используются модели объектов испытаний. Какой бы сложной ни была модель, она является лишь приближенным отображением реального объекта при принятых допущениях и ограничениях, поэтому оценивание адекватности и точности таких моделей является важнейшей задачей, так как испытания на неадекватных моделях могут приводить к неверным результатам. При программной реализации модели могут вноситься дополнительные погрешности, которые обусловлены как свойствами самих программ, так и неполным учетом возможности внешнего воздействия на них.

Исходя из положений ГОСТ 16504-81 и сложившейся практики, программные средства испытаний целесообразно отнести к испытательному оборудованию, а результаты испытаний должны быть получены при условии обеспечения единства измерений, т.е. с оцениванием показателей точности, достоверности, воспроизводимости результатов испытаний и измерений, выражением результатов испытаний и измерений в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин.

Все это приводит к необходимости создания системы подтверждения соответствия программных средств испытаний военной техники. Однако в настоящее время нет единой системы нормативных документов (ГОСТ Р, ГОСТ РВ, НТД системы ОТТ и т.д.), охватывающей все группы требований к программным средствам испытаний, включая метрологические требования.

Одним из наиболее важных направлений стандартизации является разработка стандартов, устанавливающих метрологические требования к программным средствам испытаний военной техники, а именно: требования к достоверности, точности испытаний, адекватности используемых в их составе моделей реальным объектам и т.д.

Формирование организационной структуры и нормативно-правовой базы в области подтверждения соответствия программных средств испытаний позволит обеспечить повышение качества испытаний образцов военной техники.

Список литературы

1. Лесун И. В. Основные направления развития метрологического обеспечения вооружения и военной техники. URL: <https://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-7/III/Lesun.pdf>
2. Резяпов Н. Развитие систем компьютерного моделирования в вооруженных силах США // Зарубежное военное обозрение. 2007. № 6. С. 17–23.
3. Чернов А. Ученые заявили о пути решения проблемы длительного тестирования моделей ракетных двигателей. URL: <https://topwar.ru/170400-uchenye-zajavili-o-puti-reshenija-problemy-dlitelnogo-testirovaniya-modelej-raketnyh-dvigatelej.html>
4. Доронин А. П. Концептуально-методологические основы построения тезауруса // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2013. Вып. 639. С. 186–190.
5. Демидов Б. А., Хмелевская О. А., Науменко М. В. Проблемные вопросы совершенствования понятийного аппарата в военно-технической области // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2014. № 1. С. 27–34.

References

1. Lesun I.V. *Osnovnye napravleniya razvitiya metrologicheskogo obespecheniya vooruzheniya i voennoy tekhniki = Main directions of development of Metrological support of weapons and military equipment.* (In Russ.). Available at: <https://federalbook.ru/files/OPK/Soderzhanie/OPK-7/III/Lesun.pdf>
2. Rezyapov N. Development of computer modeling systems in the US Armed forces. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie = Foreign Military Review.* 2007;(6):17–23. (In Russ.)
3. Chernov A. *Uchenye zayavili o puti resheniya problemy dlitel'nogo testirovaniya modeley raketnykh dvigateley = Scientists announced a way to solve the problem of long-term testing of rocket engine models.* (In Russ.). Available at: <https://topwar.ru/170400-uchenye-zajavili-o-puti-reshenija-problemy-dlitelnogo-testirovanija-modelej-raketnyh-dvigatlej.html>
4. Doronin A.P. Conceptual and methodological foundations of thesaurus construction. *Trudy Voennokosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhaiskogo = Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky.* 2013;(639):186–190. (In Russ.)
5. Demidov B.A., Khmelevskaya O.A., Naumenko M.V. Problematic issues of improving the conceptual apparatus in the military-technical field. *Zbirnik naukovikhprats' Kharkivs'kogo natsional'nogo universitetu Povitryanikh Sil = Collection of scientific papers of Kharkiv National Air Force University.* 2014;(1):27–34.

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Вячеславович Чащин

кандидат технических наук,
начальник лаборатории
Научно-исследовательского военного института,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Igor V. Chashchin

Candidate of technical sciences,
head of laboratory of the Research Military Institute,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

Олег Анатольевич Ширямов

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Научно-исследовательского военного института,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Oleg A. Shiryamov

Candidate of technical sciences,
senior researcher of the Research Military Institute,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

Анастасия Владимировна Колосова

научный сотрудник
Научно-исследовательского военного института,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Anastasia V. Kolosova

Middle researcher of the Research Military Institute,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

Арина Валерьевна Протасова

младший научный сотрудник
Научно-исследовательского военного института,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Arina V. Protasova

Junior researcher of the Research Military Institute,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ДАТЧИКА ИЗБЫТОЧНЫХ ДАВЛЕНИЙ

В. Н. Пономарев¹, К. И. Бастрыгин², А. А. Трофимов³, С. А. Здобнов⁴

^{1,2,4} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ revik2296@gmail.com, ² nik2@niifi.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ sa_zdobnov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Имитационное моделирование является неотъемлемой частью процесса разработки всех датчиков, работающих в жестких условиях эксплуатации. Методы имитационного моделирования позволяют получать необходимую информацию о процессах, протекающих в датчиках на этапе макетирования, не прибегая к дорогостоящим натурным испытаниям. Целью представленного имитационного моделирования является определение влияния воздействия внешних факторов на работоспособность тензорезисторного датчика давления для подтверждения правильности выбранных конструктивных решений. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый датчик заменяется его моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этом объекте. В эксперименте применялось специализированное программное обеспечение Solidworks, позволяющее избежать дорогостоящих и длительных циклов «проектирование–изготовление–испытания». *Результаты.* В результате моделирования влияния внешних факторов на работоспособность датчика определены максимальные напряжения, возникающие при воздействии синусоидальной вибрации, выявлены резонансные частоты. Заложенные конструктивные решения датчика давлений обеспечивают стойкость датчика к дестабилизирующим факторам.

Ключевые слова: имитационное моделирование, тензорезисторный датчик, давление, внешние воздействующие факторы, вибрация

Для цитирования: Пономарев В. Н., Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Здобнов С. А. Имитационное моделирование тензорезисторного датчика избыточных давлений // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 56–63. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-7

SIMULATION MODELING OF A STRAIN GAUGE OVERPRESSURE SENSOR

V.N. Ponomarev¹, K.I. Bastrygin², A.A. Trofimov³, S.A. Zdobnov⁴

^{1,2,4} Research and Development Institute for Physical Measurements, Penza, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ revik2296@gmail.com, ² nik2@niifi.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ sa_zdobnov@mail.ru

Abstract. *Background.* Simulation modeling is an integral part of the development process for all sensors operating in harsh environments. The methods of simulation modeling make it possible to obtain the necessary information about the processes occurring in the sensors at the stage of modeling, without resorting to costly in-situ tests. The purpose of the presented simulation is to determine the impact of external factors on the performance of the strain gauge pressure sensor, to confirm the correctness of the selected design solutions. *Materials and methods.* As a method of research, simulation modeling was used, in which the sensor under study is replaced by its model, with which experiments are conducted in order to obtain information about this object. Specialized Solidworks software was used in the experiment to avoid costly and time-consuming «design-build-test» cycles. *Results.* As a result of modeling the influence of external factors on the performance of the sensor the maximum stresses arising under the influence of sinusoidal vibration are determined, the resonance frequencies are identified. The structural solutions laid down by the pressure sensor provide the sensor resistance to destabilizing factors.

Keywords: simulation modeling, strain gauge, pressure, external influencing factors, vibration

For citation: Ponomarev V.N., Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Zdobnov S.A. Simulation modeling of a strain gauge overpressure sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):56–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-7

Основная часть

Современные датчики физических величин, применяемые в изделиях ракетно-космической техники, представляют собой многокомпонентные сложные динамические системы, в которых протекают взаимосвязанные физические процессы различной природы [1, 2]. При этом на датчиково-преобразующую аппаратуру воздействуют дестабилизирующие факторы, такие как широкий диапазон рабочих температур, акустический шум и особенно вибрационные ускорения. Основой и ответственной составляющей датчиков физических величин являются чувствительные элементы. В связи с этим становится актуальной задача исследования воздействия вибрационных процессов на чувствительные элементы датчиков. Вибрационные процессы во многом определяют не только точность датчиков, но и такие важные характеристики, как долговечность, надежность, время готовности и в конечном итоге эффективность их работы. Для разработки датчиковой аппаратуры необходимо уже на этапе проектирования, не прибегая к дорогостоящим натурным испытаниям, знать влияние реальных условий эксплуатации на выходные характеристики датчика. При использовании имитационного моделирования становится возможным комбинирование различных начальных условий эксплуатации, материалов и временных характеристик воздействия возмущающих факторов [3–6].

Задачами имитационного моделирования для данного датчика являются:

1. Определение максимальных виброперемещений и напряжений втулки (рис. 1,а) при воздействии повышенных виброускорений значением до 40 000 м/с² в диапазоне частот от 5 до 30000 в направлении перпендикулярно и вдоль продольной оси втулки при моментах затяжки втулки: 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 7,0 Нм, при температурах: 25, 100; минус 196 °С.
2. Определение резонансных частот втулки в корпусе датчика при моментах затяжки втулки: 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 7,0 Нм, при температурах: 25, 100; минус 196 °С.
3. Определение деформации на планарной поверхности мембраны воспринимающего элемента при моментах затяжки втулки: 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 7,0 Нм.

Для решения поставленных задач использовались граничные условия (далее – ГУ), изображенные на рис. 1,а. В ходе моделирования для первых двух задач были рассчитаны два варианта:

- а) втулка жестко связана с воспринимающим элементом в резьбовом соединении и в местах сварки;
- б) втулка жестко связана с воспринимающим элементом только в области сварки.

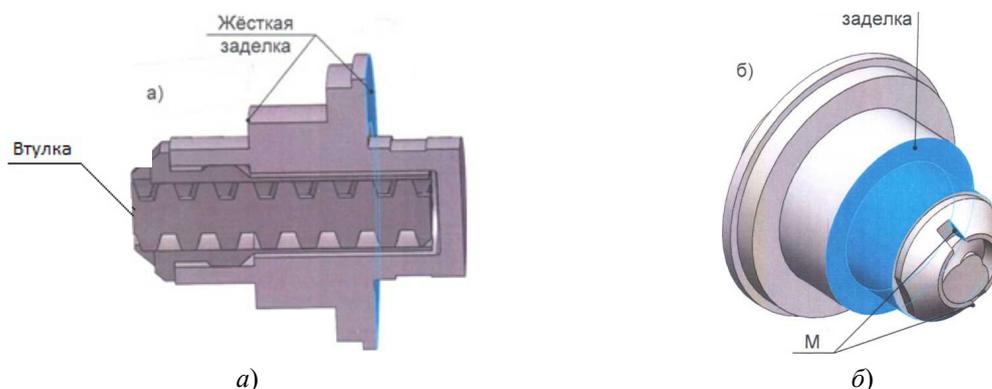


Рис. 1. Схема граничных условий:

а – виброперемещений, напряжений, резонансных частот под действием синусоидальной вибрации; б – деформаций под действием момента затяжки

Алгоритм программы построен таким образом, что передача синусоидальной вибрации происходит через грани, выбранные ГУ «Жесткая заделка». Все нелинейные контакты, допускающие относительное смещение контактирующих поверхностей, в расчете на воздействие синусоидальной вибрации не активны. Демпфирование материала составляет 4,5 %. Данное значение было выбрано из справочных данных, входящих в состав SolidWorks Simulation.

При расчете собственных частот под действием температур модуль упругости материала рассчитывался по формуле [7]:

$$E_t = E_0(1 - a_t t),$$

где E_0 – модуль упругости при температуре 25 °С; a_t – температурный коэффициент модуля упругости; t – температура.

При $a_t = 300 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ модули упругости при температуре 100°C и минус 196°C для сплава 36НХТЮ составляют: $E_{-196} = 211,76 \text{ ГПа}$; $E_{100} = 194 \text{ ГПа}$.

При $a_t = 5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ модули упругости при температуре 100°C и минус 196°C для сплава 36НКВХБТЮ составляют: $E_{-196} = 190,2 \text{ ГПа}$; $E_{100} = 189,9 \text{ ГПа}$. Ввиду отсутствия данных на данный материал при температуре минус 196°C , $a_t = 5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ был принят условно. Данное значение температурного коэффициента модуля упругости справедливо лишь в диапазоне температур от минус 60 до 130°C .

Схема граничных условий для определения деформации на планарной поверхности мембраны воспринимающего элемента при моментах затяжки втулки: 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 7,0 Нм, изображена на рис. 1,б.

Момент затяжки (согласно рис. 1,б) накладывается на две параллельные грани втулки, находящиеся на противоположной стороне относительно средней плоскости, проходящей через ось вращения.

Результаты моделирования влияния воздействия синусоидальной вибрации

На втором этапе моделирования проводился модальный расчет, в ходе которого были определены резонансные частоты расчетной модели.

Резонансная частота расчетной модели, в которой втулка контактирует в двух точках с воспринимающим элементом (в области резьбового и сварного соединений), составляет $\sim 24,3 \text{ кГц}$. Собственная частота расчетной модели, в которой втулка контактирует в одной точке (в области сварного соединения) с воспринимающим элементом, составляет $\sim 17 \text{ кГц}$.

В резонанс входит часть втулки, находящаяся в удалении от места резьбового соединения, из чего следует, что момент затяжки не влияет на собственные частоты системы.

Под действием температуры минус 196°C происходит рост собственной частоты $\sim 3\%$, а при воздействии температуры 100°C происходит уменьшение собственной частоты $\sim 1,5\%$.

На рис. 2 изображены эпюры распределения напряжений в зависимости от направления воздействия синусоидальной вибрации, при условии контакта втулки в двух точках.

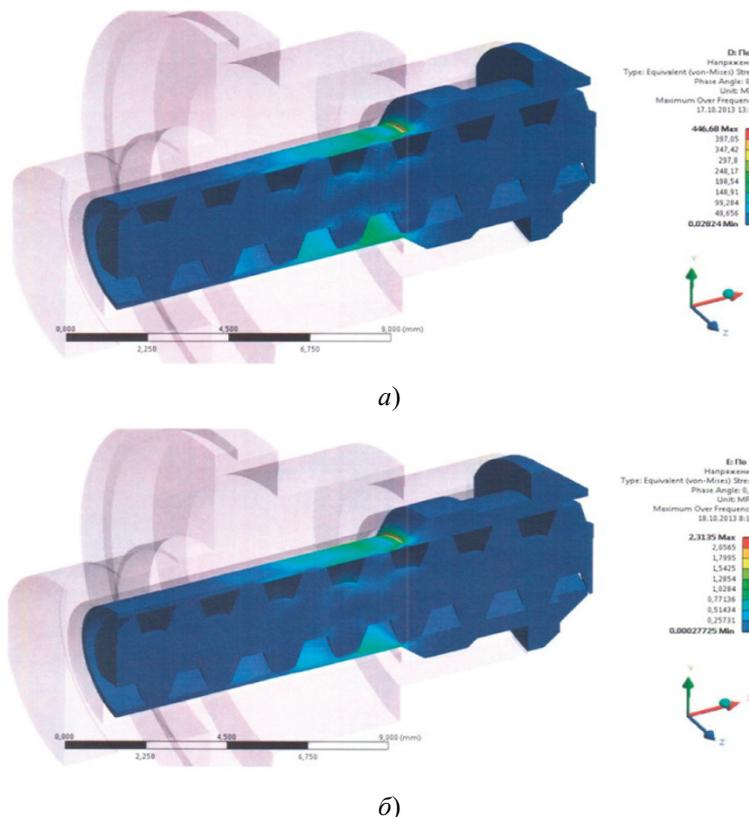


Рис. 2. Эпюры распределения критических напряжений (контакт втулки и воспринимающего элемента в двух точках) при воздействии синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения $40\,000 \text{ м/с}^2$, направленной по оси: а – Y; б – X

На рис. 3 изображены эпюры распределения напряжений в зависимости от направления воздействия синусоидальной вибрации, при условии контакта втулки только в области сварки.

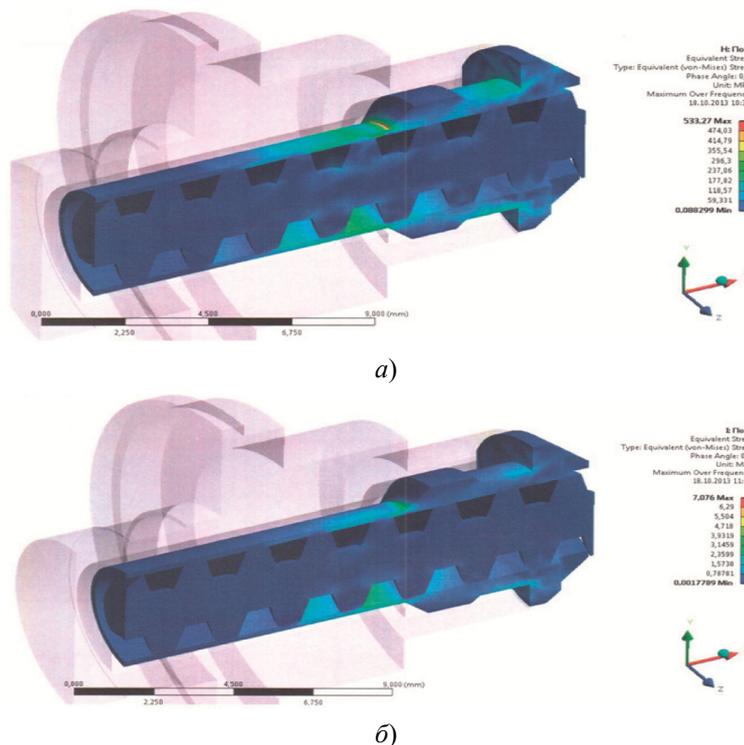


Рис. 3. Эпюра распределения критических напряжений (контакт втулки и воспринимающего элемента в одной точке) при воздействии синусоидальной вибрации с амплитудой виброускорения $40\ 000\ \text{м/с}^2$, направленной по оси: *a* – *Y*; *б* – *X*

По данным рис. 2 и 3 видно, что наибольшее негативное влияние оказывает тот случай, когда синусоидальная вибрация направлена перпендикулярно оси вращения втулки. При условии, когда втулка контактирует с воспринимающим элементом в двух точках, происходит распределение нагрузки на резьбовом и сварном соединении. В случае, когда втулка контактирует с воспринимающим элементом только в области сварного соединения, вся нагрузка сосредоточена только в сварном шве. В данном случае наблюдается значительный рост напряжений в области контактирующих поверхностей.

На рис. 4 изображена амплитудно-частотная характеристика втулки при условии ее контакта с воспринимающим элементом в двух точках, под действием синусоидальной вибрации, направленной перпендикулярно оси вращения втулки.

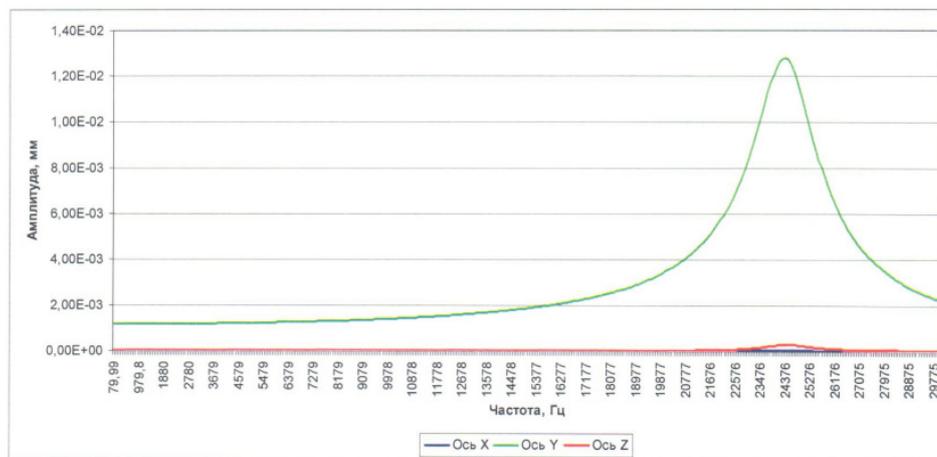


Рис. 4. Виброперемещения втулки при условии ее контакта в двух точках с воспринимающим элементом под действием синусоидальной вибрации с амплитудой виброускорения $400\ 000\ \text{м/с}^2$, направленной перпендикулярно оси вращения втулки

На рис. 5 изображена амплитудно-частотная характеристика втулки при условии ее контакта с воспринимающим элементом в двух точках, под действием синусоидальной вибрации, направленной вдоль оси вращения втулки.

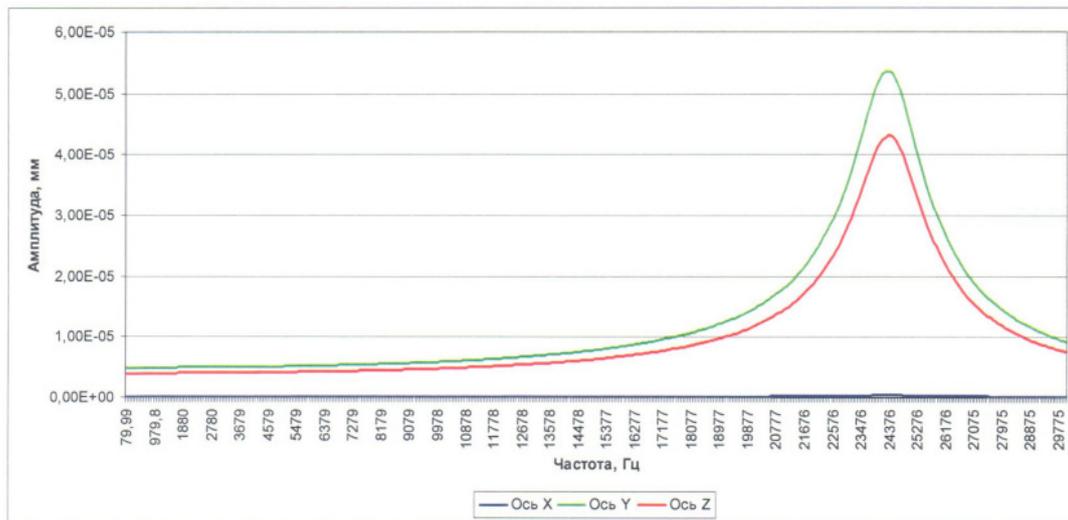


Рис. 5. Виброперемещения втулки при условии ее контакта в двух точках с воспринимающим элементом под действием синусоидальной вибрации с амплитудой виброускорения $400\,000\text{ м/с}^2$, направленной вдоль оси вращения втулки

На рис. 6 представлена амплитудно-частотная характеристика втулки при условии ее контакта с воспринимающим элементом в одной точке под действием синусоидальной вибрации, направленной перпендикулярно оси вращения втулки.

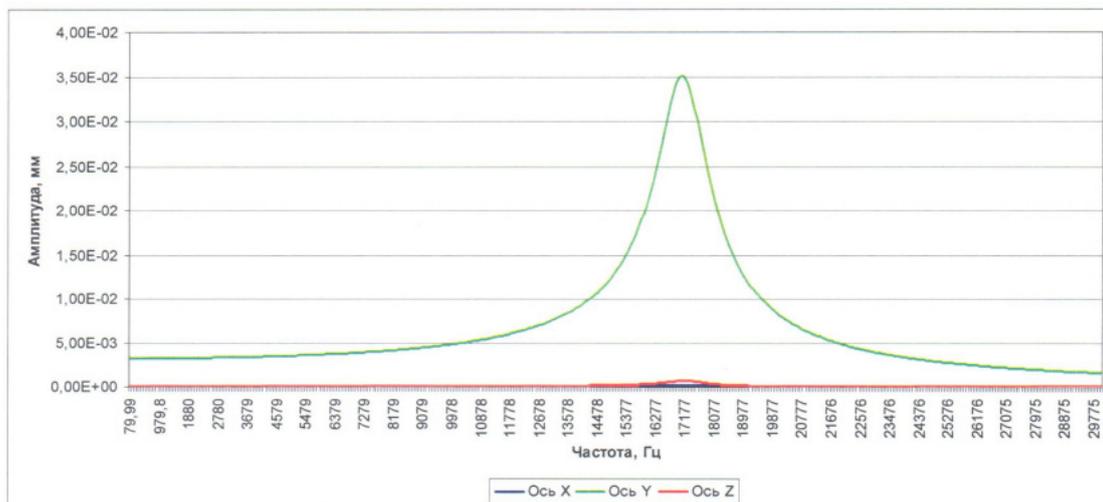


Рис. 6. Виброперемещения втулки при условии ее контакта в точке с воспринимающим элементом под действием синусоидальной вибрации с амплитудой виброускорения $400\,000\text{ м/с}^2$, направленной перпендикулярно оси вращения втулки

На рис. 7 изображена амплитудно-частотная характеристика втулки при условии ее контакта с воспринимающим элементом в одной точке, под действием синусоидальной вибрации, направленной перпендикулярно оси вращения втулки.

На рис. 8, 9 изображены графики распределения относительных радиальных деформаций на поверхности мембраны для воспринимающего элемента различных исполнений под действием момента затяжки. Двумя параллельными линиями на графиках показана область мембраны.

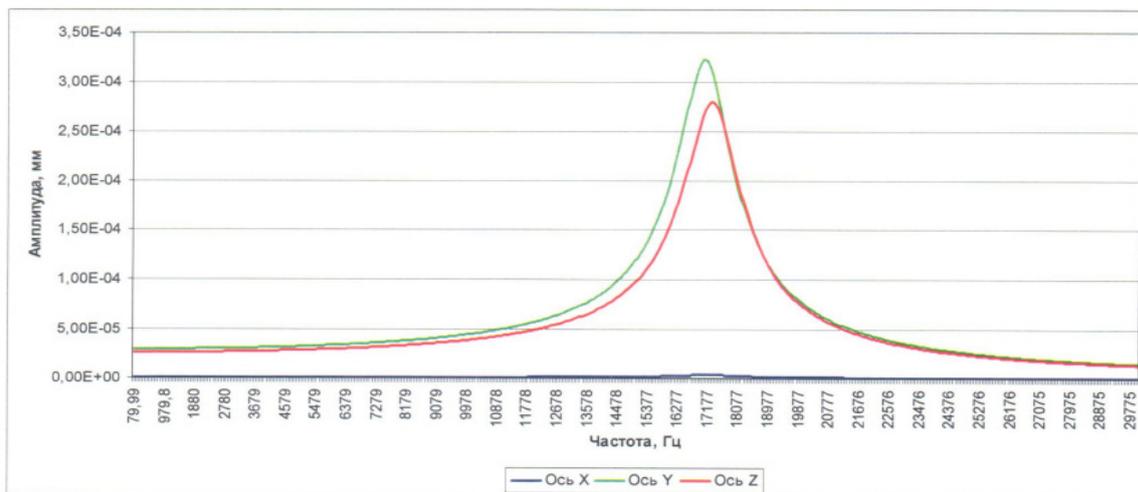


Рис. 7. Виброперемещения втулки при условии ее контакта в точке с воспринимающим элементом под действием синусоидальной вибрации с амплитудой виброускорения $400\ 000\ \text{m/s}^2$, направленной вдоль оси вращения втулки

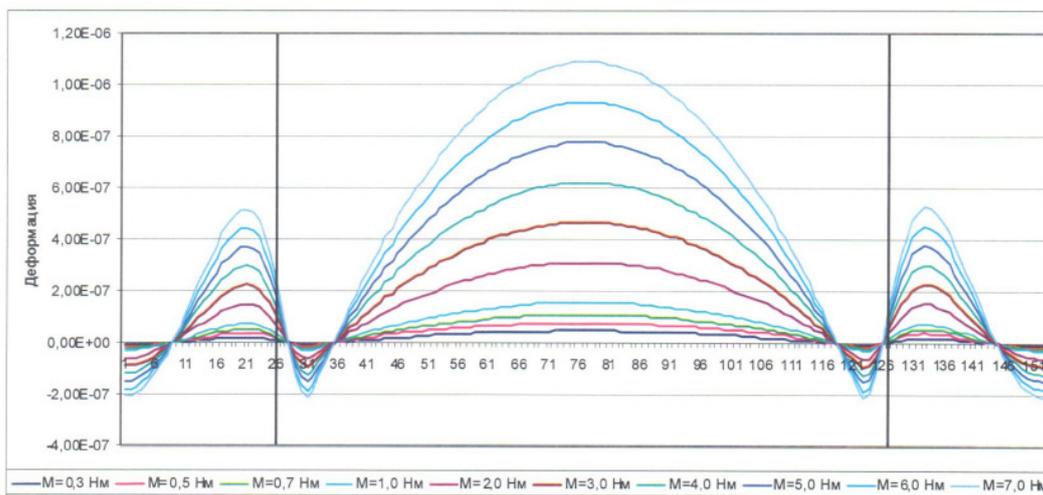


Рис. 8. Относительная радиальная деформация для воспринимающего элемента 1-го исполнения под действием момента затяжки втулки

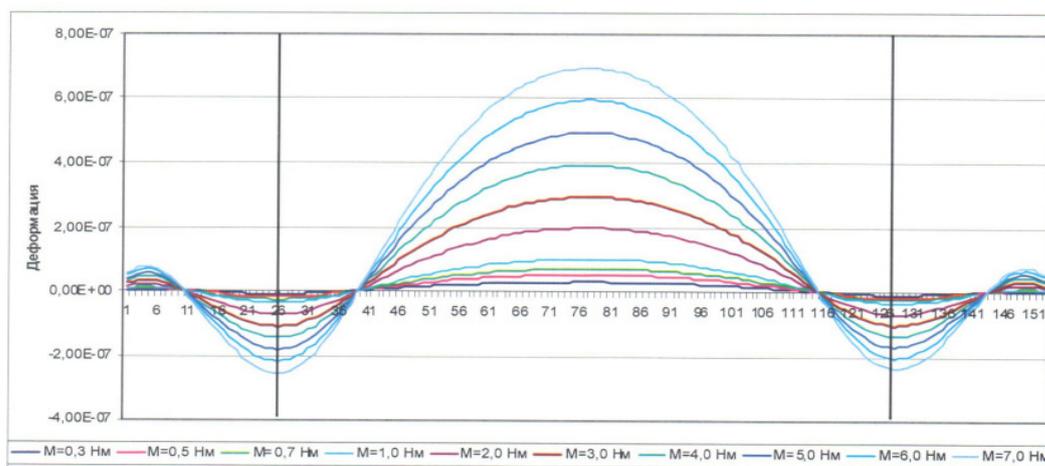


Рис. 9. Относительная радиальная деформация для воспринимающего элемента 2-го исполнения под действием момента затяжки втулки

По данным диаграмм (рис. 8, 9) видно, что характер относительных деформаций при различных толщинах мембраны заметно отличается. Значения данных деформаций не значительны и составляют 0,04 % от деформаций, вызванных давлением, равным пределу измерения.

Заключение

В результате имитационного моделирования были определены собственные частоты системы: воспринимающий элемент – втулка – винт. Первая резонансная частота составляет 24,3 кГц. Данное значение частоты входит в диапазон рабочих частот датчика – от 5 Гц до 30 кГц. При условии отсутствия достаточного ограничения в резьбовом соединении собственная частота уменьшается до 17 кГц. В данном случае в области сварного соединения образуются напряжения, которые могут привести к разрушению изделия, а также происходит значительный рост амплитуды виброускорения 2,7 раза.

Несмотря на присутствие резонанса в диапазоне рабочих частот, при фиксации втулки с помощью резьбового и сварного соединения механического разрушения не происходит, что подтверждается экспериментальными данными.

Результаты моделирования показали, что наибольшее негативное влияние оказывает тот случай, когда синусоидальная вибрация направлена перпендикулярно оси вращения втулки. При условии, когда втулка контактирует с воспринимающим элементом в двух точках, происходит распределение нагрузки на резьбовом и сварном соединении. В случае, когда втулка контактирует с воспринимающим элементом только в области сварного соединения, вся нагрузка сосредоточена только в сварном шве. В данном случае наблюдается значительный рост напряжений в области контактирующих поверхностей.

Также результаты моделирования продемонстрировали, что при несоответствии допусков геометрических размеров происходит снижение жесткости конструкции, что может привести к механическому разрушению изделия.

Результаты моделирования влияния момента затяжки втулки показывают, что момент затяжки не оказывает влияния на метрологические характеристики изделия. Значения деформаций, вызванных моментом затяжки, составляют 0,04 % от деформаций, вызванных давлением, равным верхнему пределу измерения.

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
2. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18–21.
3. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.
4. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 51–55.
5. Фролов М. А., Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа // Датчики и системы. 2014. № 7. С. 22–25.
6. Чебурахин И. Н., Ползунов И. В., Трофимов А. А. [и др.]. Компьютерное моделирование тензорезистивного датчика измерительной системы абсолютного давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 17–24.
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М. : ДМК Пресс, 2010. 464 с.

References

1. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor structures for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;(10):18–21. (In Russ.)

3. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. [et al.]. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2017;(1):20–28. (In Russ.)
4. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a sensitive element of a tensoresistive absolute pressure sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2012;(2):51–55. (In Russ.)
5. Frolov M.A., Musaev R.Sh., Trofimov A.A. Simulation modeling of a sensitive element of a string-type pressure sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems.* 2014;(7):22–25. (In Russ.)
6. Cheburakhin I.N., Polzunov I.V., Trofimov A.A. [et al.]. Computer simulation of a strain gauge sensor of an absolute pressure measuring system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(1):17–24. (In Russ.)
7. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation = Engineering calculations in SolidWorks Simulation.* Moscow: DMK Press, 2010:464. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Николаевич Пономарев

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: revik2296@gmail.com

Vladislav N. Ponomarev

Design engineer,
Research and Development Institute
for Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Кирилл Игоревич Бастрыгин

главный специалист,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Kirill I. Bastrygin

Chief specialist,
Research and Development Institute
for Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksey A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Здобнов

главный инженер,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: sa_zdobnov@mail.ru

Sergey A. Zdobnov

Chief engineer,
Research and Development Institute
for Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА НА ПОГРЕШНОСТЬ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

П. Е. Голубков¹, Е. А. Печерская², Г. В. Козлов³,
В. С. Александров⁴, О. А. Мельников⁵, Т. О. Зинченко⁶

^{1,2,3,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ golpavpnz@yandex.ru, ² pea1@list.ru, ³ gvkl17@yandex.ru,
⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ oleg-068@mail.ru, ⁶ scar0243@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объект исследования – метод косвенного измерения толщины и пористости покрытия, получаемого микродуговым оксидированием, на основе измерения импеданса. Предмет исследования – подтверждение возможности косвенного измерения толщины и пористости покрытия путем измерения импеданса. Цель исследования – получение аналитических выражений для косвенного измерения толщины и пористости покрытий и их экспериментальная проверка; исследование влияния частоты измерительного сигнала на погрешности измерения этих величин. *Материалы и методы.* Оксидные покрытия получали на образцах из технического алюминия марки АД31Т1 размером $23 \times 15 \times 1,5$ мм. Микродуговое оксидирование проводили в электролите, содержащем 0,5 г/л NaOH и 80 г/л Na_2SiO_3 , в анодно-катодном режиме с соотношением анодного и катодного токов, равным 1 при плотности тока 11 А/дм². Время обработки варьировалось от 60 до 600 с. Импеданс покрытия измеряли в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц с погрешностью $\pm 0,5$ % (по сопротивлению и по емкости) с помощью программно-аппаратного комплекса, разработанного авторами. Толщину покрытия измеряли с помощью высокоточного микрометра Mitutoyo ABSOLUTE Digimatic. *Результаты.* Установлена аналитическая зависимость толщины и пористости покрытия от модуля импеданса и частоты измерительного сигнала. Показано, что аргумент импеданса не зависит от параметров покрытия. Полученная зависимость адекватно описывает экспериментальные данные в диапазоне частот от 500 Гц до 10 кГц, при этом относительная погрешность косвенного измерения толщины по импедансу покрытия минимальна на частоте 10 кГц и составляет ± 5 %. *Выводы.* Предложенная модель имеет ограничения, связанные с трудностью одновременного измерения толщины и пористости покрытия. Для устранения этого недостатка требуется дополнительная измерительная информация или включение полученных выражений в состав системы уравнений. Тем не менее предложенная теоретическая модель может использоваться для измерения одного из параметров (толщины или пористости покрытия), если известен другой параметр или его функциональная зависимость от параметров процесса микродугового оксидирования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, косвенное измерение толщины и пористости покрытия, модуль импеданса покрытия, влияние частоты измерительного сигнала, погрешность измерения

Для цитирования: Голубков П. Е., Печерская Е. А., Козлов Г. В., Александров В. С., Мельников О. А., Зинченко Т. О. Исследование влияния частоты измерительного сигнала на погрешность косвенного измерения свойств оксидных покрытий // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 64–72. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-8

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MEASURING SIGNAL FREQUENCY ON THE INDIRECT MEASUREMENT ERROR OF OXIDE COATINGS PROPERTIES

P.E. Golubkov¹, E.A. Pecherskaya², G.V. Kozlov³,
V.S. Alexandrov⁴, O.A. Melnikov⁵, T.O. Zinchenko⁶

^{1,2,3,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia
¹ golpavpnz@yandex.ru, ² pea1@list.ru, ³ gvkl17@yandex.ru,
⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ oleg-068@mail.ru, ⁶ scar0243@gmail.com

Abstract. *Background.* The object of the study is the method of indirect measurement of the thickness and porosity of a coating obtained by microarc oxidation based on impedance measurement. The subject of the study is the confirmation of the possibility of indirect measurement of the coating thickness and porosity by measuring the impedance. The purpose of the study is to obtain analytical expressions for indirect measurement of the thickness and porosity of coatings and their experimental verification; to study the influence of the measuring signal frequency on the measurement errors of these quantities. *Materials and methods.* Oxide coatings were obtained on samples of technical aluminum grade AD31T1 with a size of $23 \times 15 \times 1.5$ mm. Microarc oxidation was carried out in an electrolyte containing 0.5 g/l NaOH and 80 g/l Na_2SiO_3 in the anode-cathode mode with a ratio of anode and cathode currents equal to 1 at a current density of 11 A/dm². The processing time was varied from 60 to 600 s. The impedance of the coating was measured in the frequency range from 20 Hz to 10 kHz with an error of ± 0.5 % (in resistance and capacitance) using the software – hardware complex developed by the authors. The thickness of the coating was measured using a high-precision Mitutoyo ABSOLUTE Digimatic micrometer. *Results.* The analytical dependence of the thickness and porosity of the coating on the impedance modulus and the measuring signal frequency is established. It is shown that the impedance argument does not depend on the coating parameters. The obtained dependence adequately describes experimental data in the frequency range from 500 Hz to 10 kHz, while the relative error of indirect measurement of the thickness by the coating impedance is minimal at a frequency of 10 kHz and is ± 5 %. *Conclusions.* The proposed model has limitations related to the difficulty of simultaneously measuring the thickness and porosity of the coating. To eliminate this disadvantage, additional measurement information is required or the inclusion of the obtained expressions in the system of equations. Nevertheless, the proposed theoretical model can be used for measuring one of the parameters (thickness or porosity of the coating) if another parameter or its functional dependence on the parameters of the microarc oxidation process is known.

Keywords: micro-arc oxidation, indirect measurement of coating thickness and porosity, coating impedance modulus, influence of measuring signal frequency, measurement error

For citation: Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Kozlov G.V., Alexandrov V.S., Melnikov O.A., Zinchenko T.O. Study of the influence of the measuring signal frequency on the indirect measurement error of oxide coatings properties. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):64–72. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-8

Введение

Микродуговое оксидирование (МДО) – процесс формирования покрытий на металлах и сплавах вентильной группы (алюминия, магния, титана и др.) в электролитной плазме – вызывает большой интерес ученых со всего мира благодаря высоким эксплуатационным характеристикам формируемых покрытий (износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и др.), значительно превосходящим аналогичные параметры существующих аналогов, в том числе покрытий, полученных твердым анодированием [1]. МДО-покрытия могут найти применение во многих отраслях промышленности, особенно в тех ее сферах, где изделия испытывают экстремальные нагрузки и работают в жестких условиях эксплуатации. Кроме того, специальные свойства покрытий открывают новые возможности их применения в медицине, дозиметрии, электронике и робототехнике [2–5].

Одним из основных параметров, определяющих качество покрытий, является толщина, однако ее измерение в случае МДО-процесса связано с некоторыми трудностями. Во-первых, во многих отечественных и зарубежных работах характеристики покрытий, в том числе толщина, исследуются на готовых образцах, что приводит к возникновению погрешностей, обусловленных влиянием многих факторов на свойства покрытий в процессе их формирования. Во-вторых, существующие установки МДО [6, 7], несмотря на возможность косвенного измерения толщины покрытия в режиме реального времени (во время нанесения покрытий), несовершенны с метрологической точки зрения (погрешность измерения толщины составляет ± 10 %). Все это свидетельствует о необходимости разработки новых методов и методик косвенных измерений параметров оксидных покрытий, позволяющих повысить их точность, а также нового оборудования МДО, реализующего данные методики. Данная статья посвящена получению и экспериментальной проверке расчетных формул, обеспечивающих косвенное измерение толщины и пористости путем измерения импеданса покрытия, а также исследованию влияния частоты измерительного сигнала на погрешности измерения этих величин.

Постановка задачи

Получим выражения для расчета толщины и пористости покрытия. Сопротивление R и емкость покрытия C имеют классический вид:

$$R = \frac{\rho h}{S}; \quad C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h}, \quad (1)$$

где ρ , ε – удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость оксида алюминия, ε_0 – диэлектрическая постоянная, S – площадь большей грани тонкого прямоугольного образца, h – толщина покрытия.

Рассчитаем модуль $|\bar{Z}|$ и аргумент импеданса φ исследуемого образца по параллельной схеме замещения:

$$|\bar{Z}| = \frac{\rho h}{S} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \varepsilon^2 \varepsilon_0^2 \rho^2}}; \quad (2)$$

$$\varphi = \arctg(-\omega \varepsilon \varepsilon_0 \rho), \quad (3)$$

где ω – циклическая частота. Видно, что модуль и аргумент импеданса зависят от частоты измерительного сигнала. Выражения (2) и (3) получены для сплошного образца и не учитывают пористость покрытия, из-за чего расчетная толщина будет меньше наблюдаемой. Этот недостаток устраняется, если учесть пористость в выражениях (1):

$$R_{por} = \frac{\rho h}{S} \cdot \frac{1}{P} = \frac{R}{P}, \quad (4)$$

$$C_{por} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h} \cdot P = C \cdot P, \quad (5)$$

$$|\bar{Z}_{por}| = \frac{h}{SP} \cdot \frac{\rho}{\sqrt{1 + \omega^2 \varepsilon^2 \varepsilon_0^2 \rho^2}} = \frac{h}{P} \cdot \frac{1}{S} \cdot A(\omega), \quad (6)$$

где R_{por} , C_{por} , $|\bar{Z}_{por}|$ – сопротивление, емкость и модуль импеданса образца с пористым покрытием; P – объемная пористость покрытия. Видно, что модуль импеданса линейно зависит от отношения толщины и пористости, причем функция $A(\omega)$ постоянна для каждой частоты. Аргумент импеданса φ не зависит от толщины и пористости и определяется выражением (3).

Выразив из (6) отношение толщины и пористости, получим

$$\frac{h}{P} = \frac{|\bar{Z}_{por}| \cdot S}{A(\omega)}. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет косвенно измерить толщину и пористость покрытия, однако выделить эти параметры по отдельности не представляется возможным. С другой стороны, подобные эмпирические формулы успешно использовались в работе [8] для определения толщины и пористости МДО-покрытия по сопротивлению и емкости границы раздела фаз покрытие – электролит.

Таким образом, задача настоящего исследования – проверить работоспособность выражения (7), а также исследовать зависимость толщины и пористости покрытия от частоты измерительного сигнала и определить погрешность косвенного измерения толщины МДО-покрытий.

Материалы и методика

МДО-покрытия получали на образцах из технического алюминия марки АД31Т1 размером $23 \times 15 \times 1,5$ мм. В качестве токоподвода использовались отрезки алюминиевой проволоки в полиолефиновой изоляции. МДО-обработку проводили в электролите, содержащем 0,5 г/л

NaOH и 80 г/л Na_2SiO_3 , в анодно-катодном режиме с соотношением анодного и катодного токов $I_K/I_A = 1$ при плотности тока $j = 11 \text{ А/дм}^2$. Время МДО обработки t изменялось согласно табл. 1.

Таблица 1

Параметры обработки и характеристики МДО-покрытий

Образец	Время обработки t , с	Толщина покрытия h , мкм	Пористость покрытия P , %
S_1	60	6	7,53
S_2	240	23	18,05
S_3	600	43	26,55

Импеданс покрытия измерялся в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц с погрешностью $\pm 0,5\%$ [9] (по сопротивлению и по емкости) с помощью разработанного авторами [10] программно-аппаратного комплекса МДО (рис. 1,а). В состав прибора входит: источник технологического тока, измерительный модуль, микропроцессорный модуль, гальваническая ячейка с защитным ограждением и блок питания. Измерительный модуль включает в себя каналы измерения следующих величин: ток и напряжение в гальванической ячейке; температура, мутность и проводимость электролита; импеданс покрытия.

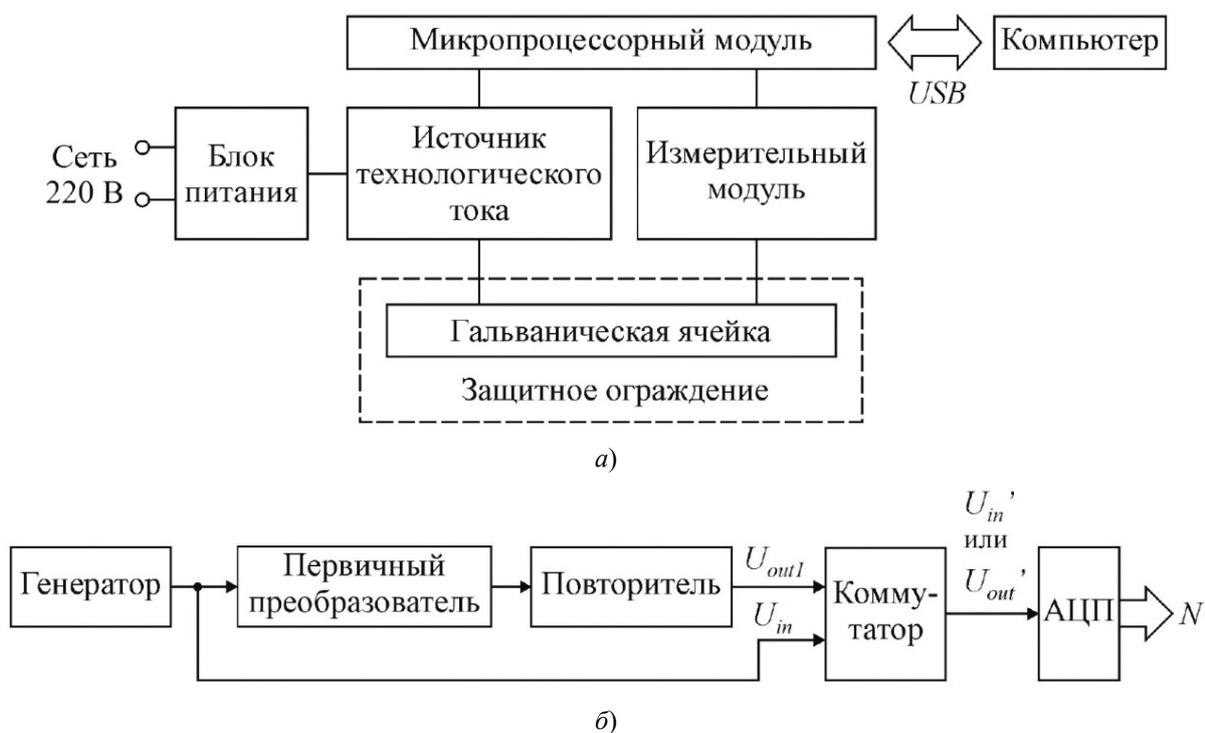


Рис. 1. Структура программно-аппаратного комплекса МДО (а); структура измерительного канала импеданса МДО-покрытий (б)

Структура измерительного канала импеданса МДО-покрытия показана на рис. 1,б. Измерительный канал состоит из генератора, первичного преобразователя, повторителя, коммутатора и АЦП. Первичным преобразователем является конденсаторный делитель напряжения, в верхнее плечо которого подключается исследуемый образец (гальваническая ячейка), а в нижнее плечо – RC -цепь, выполняющая функции образцовой меры импеданса. Повторитель служит для снижения погрешности согласования первичного преобразователя с коммутатором. На вход АЦП с помощью коммутатора попеременно поступают сигналы входного и выходного напряжения первичного преобразователя, которые далее через USB -интерфейс передаются на компьютер, на котором с помощью программного обеспечения рассчитывается импеданс.

Толщину покрытия на готовых образцах измеряли высокоточным микрометром *Mitutoyo ABSOLUTE Digimatic*.

Результаты

Экспериментальные зависимости сопротивления и емкости покрытия от частоты измерительного сигнала показаны на рис. 2. На графиках видно, что при увеличении времени обработки сопротивление покрытия возрастает, а емкость падает: это связано с ростом толщины покрытия. Частотная зависимость электрических параметров покрытия обусловлена тем, что импеданс МДО-покрытия имеет не только активную, но и емкостную составляющие.

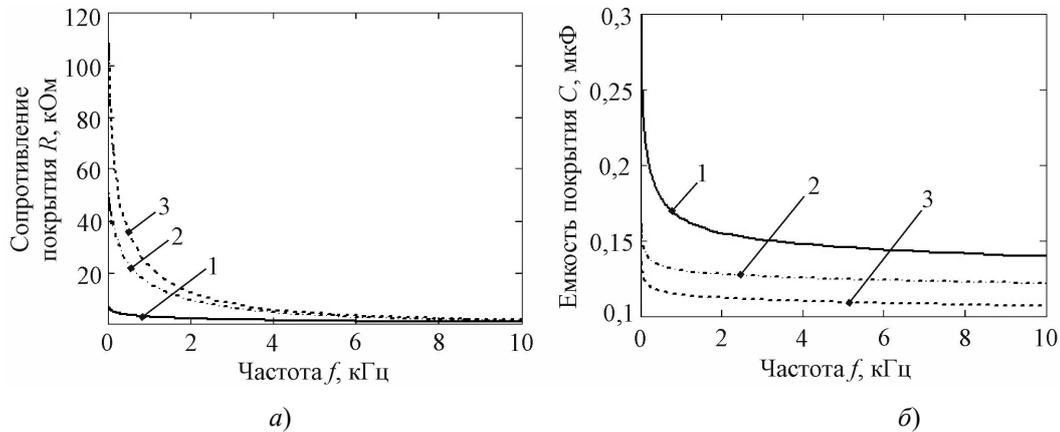


Рис. 2. Зависимости сопротивления (а) и емкости покрытия (б) от частоты измерительного сигнала для времени МДО-обработки: 1 – 60 с (образец S_1); 2 – 240 с (образец S_2); 3 – 600 с (образец S_3)

На основе полученных данных о сопротивлении и емкости построены графики частотных зависимостей модуля импеданса покрытия для образцов S_1 – S_3 (рис. 3), на которых точками показаны экспериментальные зависимости, а сплошными линиями – кривые, построенные по выражению (6). Видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом в диапазоне частот от 500 Гц до 10 кГц.

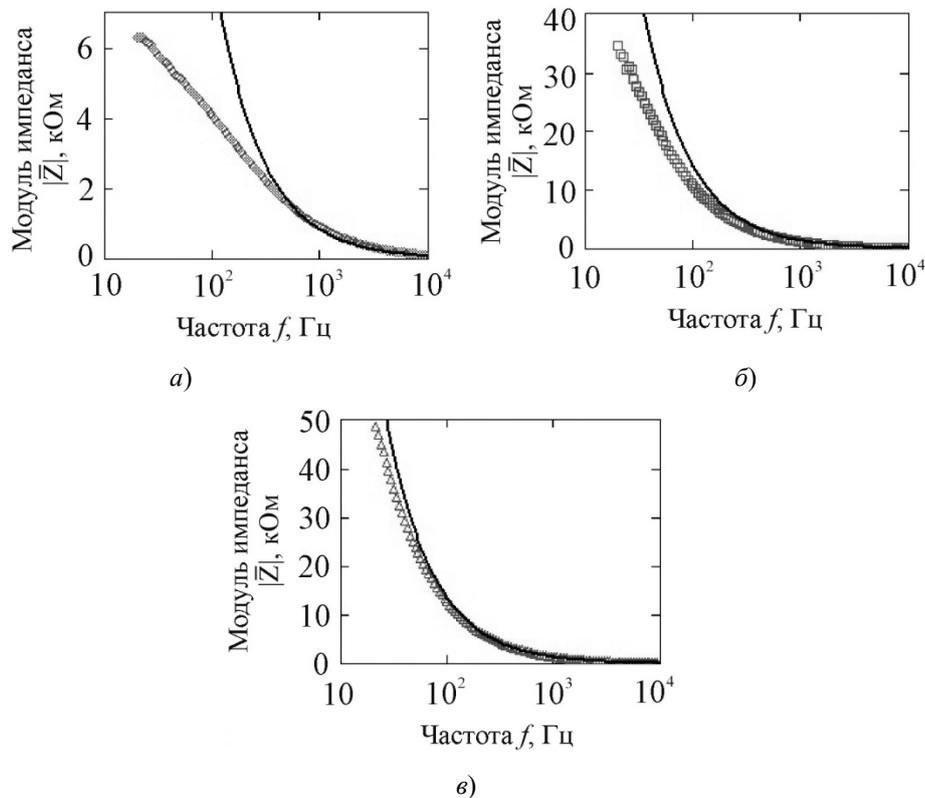


Рис. 3. Частотная зависимость модуля импеданса МДО-покрытия: а – образец S_1 ; б – образец S_2 ; в – образец S_3

Согласно выражению (7), при известной пористости (см. табл. 1) толщина покрытия h_T является линейной функцией модуля импеданса при фиксированной частоте:

$$h_T = |\bar{Z}_{por}| \cdot \frac{SP}{A(\omega)}. \quad (8)$$

На рис. 4 показаны зависимости толщины от модуля импеданса для четырех частот из выбранного ранее диапазона измерения. Видно, что линейные функции, рассчитанные по формуле (8) (штриховые линии), адекватно описывают экспериментальные данные (показаны точками). Таким образом, можно заключить, что выражение (7) является работоспособным.

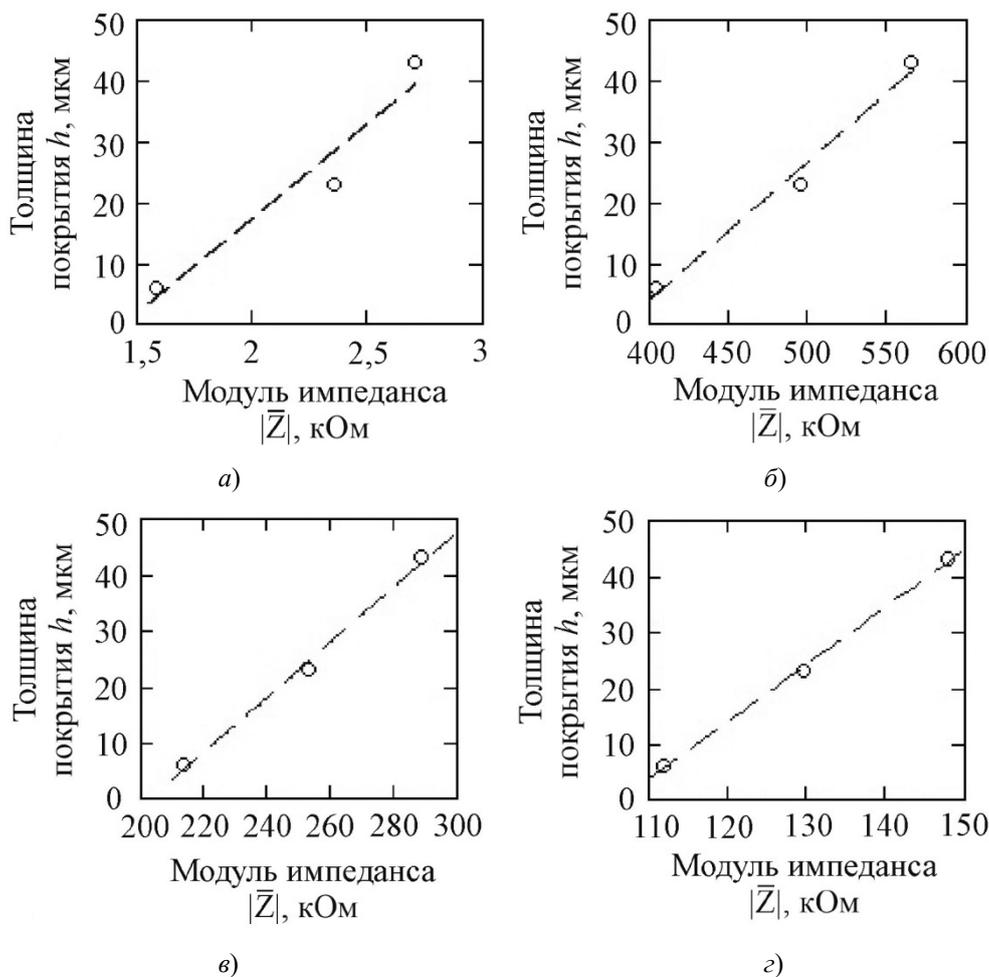


Рис. 4. Зависимости толщины покрытия от модуля импеданса для разных частот: $a - 500$ Гц; $b - 2,5$ кГц; $v - 5$ кГц; $z - 10$ кГц

На основе полученных данных рассчитана относительная погрешность δh косвенного измерения толщины покрытий в зависимости от частоты измерительного сигнала, как показано в табл. 2. Видно, что на частоте 10 кГц погрешность δh не превышает 5 %, что говорит о целесообразности использования этой частоты для косвенного измерения толщины покрытий.

Таблица 2

Относительная погрешность косвенного измерения толщины покрытий

Частота f , кГц	Погрешность измерения толщины δh , %
0,5	28,06
2,5	19,19
5	13,12
10	4,59

График зависимости погрешности измерения толщины покрытий от частоты измерительного сигнала показан на рис. 5. Данная зависимость хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией вида

$$\delta h(f) = \exp(k_1 f + k_2), \quad (9)$$

где k_1 и k_2 – эмпирические коэффициенты. Возможность такой аппроксимации является полезной с точки зрения обеспечения автоматизированного управляемого синтеза МДО-покрытий.

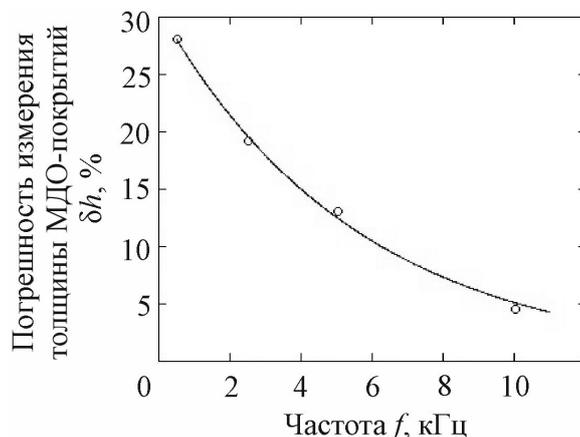


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности косвенного измерения толщины МДО-покрытий от частоты измерительного сигнала

Заключение

Полученное выражение (7) может быть использовано для косвенного измерения толщины и пористости МДО-покрытий, однако следует учитывать некоторые ограничения:

- диапазон частот измерительного сигнала от 500 Гц до 10 кГц;
- измерение толщины покрытия как отдельной физической величины (независимо от пористости) возможно только при наличии системы уравнений, в состав которой входит выражение (7). В противном случае для применения данной формулы требуется дополнительная измерительная информация.

Непосредственно формулу (7) можно использовать в следующих случаях:

- если по измеренным значениям толщины / пористости покрытия требуется определить пористость / толщину;
- известны регрессионные уравнения зависимости толщины / пористости покрытия от параметров-воздействий процесса МДО и необходимо получить аналогичные зависимости для пористости / толщины.

В результате исследования показано, что относительная погрешность измерения толщины покрытий, полученная с использованием результатов расчета по выражению (7), на частоте 10 кГц составляет $\pm 5\%$, что ниже, чем в существующих измерительных установках МДО ($\pm 10\%$). Это свидетельствует о целесообразности использования полученных аналитических выражений для измерения толщины и пористости МДО-покрытий.

Список литературы

1. Haghghat-Shishavan B., Azari-Khosrowshahi R., Haghghat-Shishavan S. [et al.]. Improving wear and corrosion properties of alumina coating on AA7075 aluminum by plasma electrolytic oxidation: Effects of graphite absorption // Applied Surface Science. 2019. Vol. 481. P. 108–119. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.03.069
2. Xia Q., Zhang D., Li D. [et al.]. Preparation of the plasma electrolytic oxidation coating on Mg-Li alloy and its thermal control performance // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 369. P. 252–256. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.073
3. Zolotarjovs A., Smits K., Laganovska K. [et al.]. Thermostimulated luminescence of plasma electrolytic oxidation coatings on 6082 aluminium surface // Radiation Measurements. 2019. Vol. 124. P. 29–34. doi: 10.1016/j.radmeas.2019.02.020

4. Santos J. S., Rodrigues A., Simon A. P. [et al.]. One-Step Synthesis of Antibacterial Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum // *Advanced Engineering Materials*. 2019. Vol. 21. P. 1900119. doi: 10.1002/adem.201900119
5. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultraceraamic: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys // *Surface & Coatings Technology*. 2019. Vol. 369. P. 142–155. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.025
6. Bolshenko A. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Panenko I. N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices // *Life Science Journal*. 2014. Vol. 11. P. 263–268.
7. Фаткуллин А. Р., Парфенов Е. В. Автоматизация технологического процесса плазменно-электролитического оксидирования на основе косвенного контроля толщины покрытия по электрическим характеристикам // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2016. Т. 20, № 4. С. 38–44.
8. Мамаев А. И., Мамаева В. А., Бориков В. Н., Дорофеева Т. И. Формирование наноструктурных неметаллических неорганических покрытий путем локализации высокоэнергетических потоков на границе раздела фаз : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского университета, 2010. 360 с.
9. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Карпанин О. В. [и др.]. Метрологический анализ канала измерения импеданса гальванической ячейки в процессе микродугового оксидирования // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2021. № 4. С. 41–50. doi: 10.21685/2307-5538-2021-4-5
10. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Development of theoretical foundations of the controlled synthesis of multifunctional coatings by the micro-arc oxidation method // *FRUCT 2020: Proc. of Conference of Open Innovations Association*. 2020. № 26. P. 91–101. doi: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087360
11. Artamonov D. V., Golubkov P. E., Pecherskaya E. A. [et al.]. Methods of applying the reliability theory for the analysis of micro-arc oxidation process // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. P. 081014.
12. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Мартынов А. В. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового оксидирования // *Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития* : тез. докл. третьей Всерос. молодежной науч. конф. Тамбов, 2018. С. 111–113.

References

1. Haghghat-Shishavan B., Azari-Khosrowshahi R., Haghghat-Shishavan S. [et al.]. Improving wear and corrosion properties of alumina coating on AA7075 aluminum by plasma electrolytic oxidation: Effects of graphite absorption. *Applied Surface Science*. 2019;481:108–119. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.03.069
2. Xia Q., Zhang D., Li D. [et al.]. Preparation of the plasma electrolytic oxidation coating on Mg-Li alloy and its thermal control performance. *Surface and Coatings Technology*. 2019;369:252–256. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.073
3. Zolotarjovs A., Smits K., Laganovska K. [et al.]. Thermostimulated luminescence of plasma electrolytic oxidation coatings on 6082 aluminium surface. *Radiation Measurements*. 2019;124:29–34. doi: 10.1016/j.radmeas.2019.02.020
4. Santos J.S., Rodrigues A., Simon A.P. [et al.]. One-Step Synthesis of Antibacterial Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum. *Advanced Engineering Materials*. 2019;21:1900119. doi: 10.1002/adem.201900119
5. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultraceraamic: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys. *Surface & Coatings Technology*. 2019;369:142–155. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.025
6. Bolshenko A.V., Pavlenko A.V., Puzin V.S., Panenko I.N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices. *Life Science Journal*. 2014;11:263–268.
7. Fatkullin A.R., Parfenov E.V. Automation of the technological process of plasma-electrolytic oxidation based on indirect control of the coating thickness by electrical characteristics. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2016;20(4):38–44. (In Russ.)
8. Mamaev A.I., Mamaeva V.A., Borikov V.N., Dorofeeva T.I. *Formirovanie nanostrukturnykh nemetallicheskikh neorganicheskikh pokrytiy putem lokalizatsii vysokoenergeticheskikh potokov na granitse razdela faz: ucheb. posobie = Formation of nanostructured non-metallic inorganic coatings by localization of high-energy flows at the interface of phases : a textbook*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta, 2010:360. (In Russ.)
9. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Karpanin O.V. [et al.]. Metrological analysis of the channel for measuring the impedance of a galvanic cell in the process of microarc oxidation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(4):41–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2021-4-5
10. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Development of theoretical foundations of the controlled synthesis of multifunctional coatings by the micro-arc oxidation method. *FRUCT 2020*:

Proc. of Conference of Open Innovations Association. 2020;(26):91–101. doi: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087360

11. Artamonov D.V., Golubkov P.E., Pecherskaya E.A. [et al.]. Methods of applying the reliability theory for the analysis of micro-arc oxidation process. *Journal of Physics: Conference Series.* 2018:081014.
12. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Martynov A.V. Application of quality control tools for the analysis of the microarc oxidation process. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vseros. molodezhnoy nauch. konf. = Radioelectronics. Problems and prospects of development : abstracts of the third All-Russian conference. youth scientific conference.* Tambov, 2018:111–113. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Евгеньевич Голубков

инженер кафедры информационно-измерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golpavpnz@yandex.ru

Pavel E. Golubkov

Engineer of the sub-department of information and measuring equipment and metrology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационно-измерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, associate professor, head of the sub-department of information and measuring equipment and metrology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Геннадий Васильевич Козлов

доктор технических наук, профессор, директор Политехнического института, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gvk17@yandex.ru

Gennady V. Kozlov

Doctor of technical sciences, professor, director of the polytechnic institute, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владимир Сергеевич Александров

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vsalexrus@gmail.com

Vladimir S. Alexandrov

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Олег Андреевич Мельников

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oleg-068@mail.ru

Oleg A. Melnikov

Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Тимур Олегович Зинченко

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

УДК 621.3.032

doi:10.21685/2307-5538-2022-1-9

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ВИДЕ КРУГЛОЙ МЕМБРАНЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ЛИНЕЙНОСТИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

Е. А. Рыблова¹, В. С. Волков²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ Elizaveta.ryblova@mail.ru, ² vadimv_1978@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью исследования является разработка полупроводникового чувствительного элемента для датчика давления на основе тензорезистивного эффекта в виде профилированной мембраны с повышенной чувствительностью и сниженной погрешностью линейности выходного сигнала. *Материалы и методы.* Проведено имитационное моделирование чувствительного элемента в виде профилированной мембраны в программном пакете COMSOL Multyphysics для определения геометрических параметров сечения кремниевой мембраны, обеспечивающих оптимальное соотношение чувствительности и погрешности линейности выходного сигнала. *Результаты.* Создана имитационная модель полупроводникового чувствительного элемента датчика давления, позволяющая повысить чувствительность и снизить погрешность линейности выходного сигнала. *Выводы.* Таким образом, на основе проведенного моделирования были определены оптимальные геометрические параметры сечения профилированной мембраны полупроводникового тензопреобразователя давления мембранного типа.

Ключевые слова: полупроводниковый чувствительный элемент, кремниевая мембрана, повышение чувствительности, погрешность линейности

Для цитирования: Рыблова Е. А., Волков В. С. Оптимизация параметров полупроводникового чувствительного элемента в виде круглой мембраны с целью повышения чувствительности и снижения погрешности линейности выходного сигнала // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 73–79. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-9

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF A SEMICONDUCTOR SENSING ELEMENT IN THE FORM OF A ROUND MEMBRANE IN ORDER TO INCREASE THE SENSITIVITY AND REDUCE THE LINEARITY ERROR OF THE OUTPUT SIGNAL

E.A. Ryblova¹, V.S. Volkov²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia

¹ Elizaveta.ryblova@mail.ru, ² vadimv_1978@mail.ru

Abstract. *Background.* The aim of the study is to develop a semiconductor sensing element for a pressure sensor based on a strain-resistive effect in the form of a profiled membrane with increased sensitivity and reduced linearity error of the output signal. *Materials and methods.* The simulation of a sensor element in the form of a profiled membrane in the COMSOL Multiphysics software package was carried out to determine the geometric parameters of the silicon membrane cross-section, providing an optimal ratio of sensitivity and linearity error of the output signal. *Results.* A simulation model of a semiconductor pressure sensor sensor element has been created, which allows to increase the sensitivity

ty and reduce the linearity error of the output signal. *Conclusions.* Thus, on the basis of the conducted modeling, the optimal geometric parameters of the cross-section of the profiled membrane of a semiconductor pressure strain converter of the membrane type were determined.

Keywords: semiconductor sensing element, silicon membrane, increased sensitivity, linearity error

For citation: Ryblova E.A., Volkov V.S. Optimization of the parameters of a semiconductor sensing element in the form of a round membrane in order to increase the sensitivity and reduce the linearity error of the output signal. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):73–79. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-9

Введение

В настоящее время широкое распространение получили полупроводниковые тензодатчики давления мембранного типа. В основном в таких датчиках применяются плоские мембраны или мембраны с жестким центром. Одними из основных требований к современным полупроводниковым тензодатчикам давления являются повышение чувствительности и снижение погрешности выходного сигнала.

Повышение чувствительности полупроводникового тензодатчика с плоской мембраной обеспечивается уменьшением толщины мембраны, однако уменьшать толщину плоской мембраны можно только до определенных пределов, обусловленных технологией изготовления, кроме того, уменьшение толщины мембраны приводит к дополнительной погрешности линейности выходного сигнала полупроводникового тензодатчика давления.

Некоторое увеличение выходного сигнала и линейности функции преобразования обеспечивают мембраны с жестким центром, однако такие элементы чувствительны к воздействию ударов и вибраций, при воздействии которых жесткий центр ведет себя подобно инерционной массе, что приводит к дополнительной погрешности выходного сигнала.

Материалы и методы

Анализ современной литературы показал, что в настоящее время зарубежными учеными исследуются полупроводниковые чувствительные элементы (ЧЭ) в виде мембран переменной толщины, профиль которых имеет широкие участки в области жесткой заделки и более тонкий участок в центре [1]. В статье [2] описано исследование профилированной мембраны, позволяющей повысить чувствительность полупроводникового тензодатчика давления. На рис. 1 представлен эскиз профилированной мембраны, соотношение толщины широкого и узкого участков составляет 3 к 1, а переход от узкого участка к широкому расположен на расстоянии 0,95 мм от центра мембраны, моделирование которой описано в статье [2]. В результате моделирования были получены следующие параметры ЧЭ: чувствительность составила 1505,85, а погрешность линейности – 3,33 %.

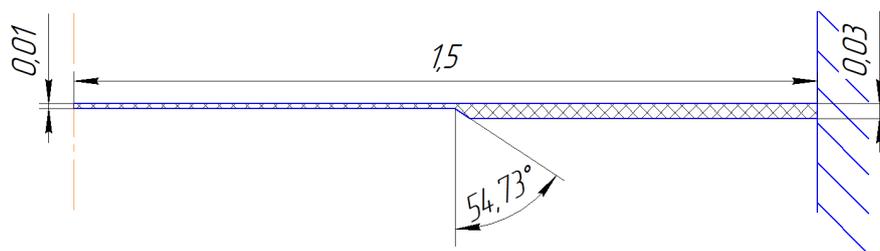


Рис. 1. Эскиз профилированной мембраны

Дальнейшее исследование конструкции профилированной мембраны направлено на снижение погрешности линейности. Для определения минимальной погрешности линейности профилированной мембраны с координатой ступеньки на расстоянии 0,95 мм от центра изменялась толщина широкого участка мембраны от 30 до 40 мкм, с интервалом 1 мкм, при этом толщина узкого участка оставалась 10 мкм, таким образом, отношение ширины участков менялось от 3 к 1 до 4 к 1.

Для каждого случая был построен график зависимости разности радиального и тангенциального напряжений от приложенного давления и рассчитаны погрешность линейности и чувствительность, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Отношение широкого и узкого участков	Погрешность линейности, %	Чувствительность
3 к 1	3,33	1505,85
3,1 к 1	3,03	1430,7
3,2 к 1	2,78	1370,4
3,3 к 1	2,56	1311,6
3,4 к 1	2,39	1260,1
3,5 к 1	2,54	1198,9
3,6 к 1	1,62	1153,3
3,7 к 1	1,53	1105,6
3,8 к 1	1,54	1053,6
3,9 к 1	1,55	1012,8
4 к 1	1,83	972,8

Исходя из полученных данных, представленных в табл. 1, видно, что мембраны с соотношениями 3,6 к 1, 3,7 к 1, 3,8 к 1 и 3,9 к 1 имеют низкую погрешность линейности выходного сигнала, однако в случае с мембраной с соотношением 3,6 к 1 чувствительность не уступает плоской мембране равной 1129,9.

На рис. 2 представлен график зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления для профилированной мембраны с соотношением широкого и узкого участков 3,6 к 1 и координатой ступеньки на расстоянии 0,95 мм от центра.

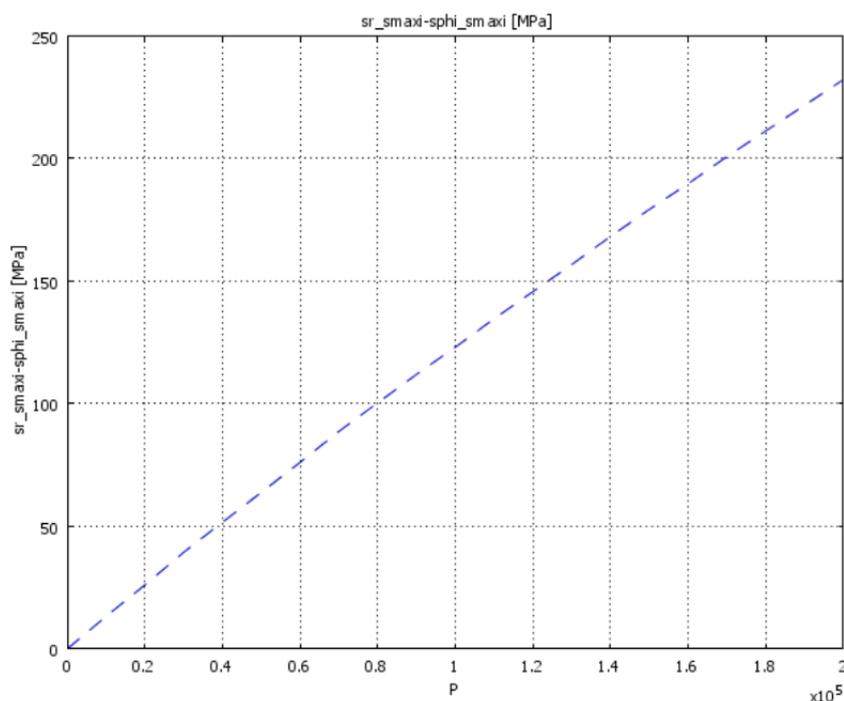


Рис. 2. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления при отношении 3,6 к 1

Из результатов проведенного моделирования и расчетов погрешности линейности видно, что наименьшая погрешность линейности соответствует мембране с отношением толщины широкого и узкого участков 3,6 к 1, она составляет 1,62 %, при этом чувствительность снизилась по сравнению с мембраной с соотношением широкого и узкого участков 3 к 1 приблизительно на 23 %.

Было проведено сравнение профилированной мембраны диаметром 1,5 мм, с соотношением участков 3,6 к 1 с плоской мембраной толщиной 0,03 мм и плоской мембраной толщиной 0,036 мм. В одной системе координат были построены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжения для плоской мембраны и профилированной мембраны.

На рис. 3 представлены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжений для плоской мембраны толщиной 0,03 мм (сплошная линия) и профилированной мембраны (пунктирная линия).

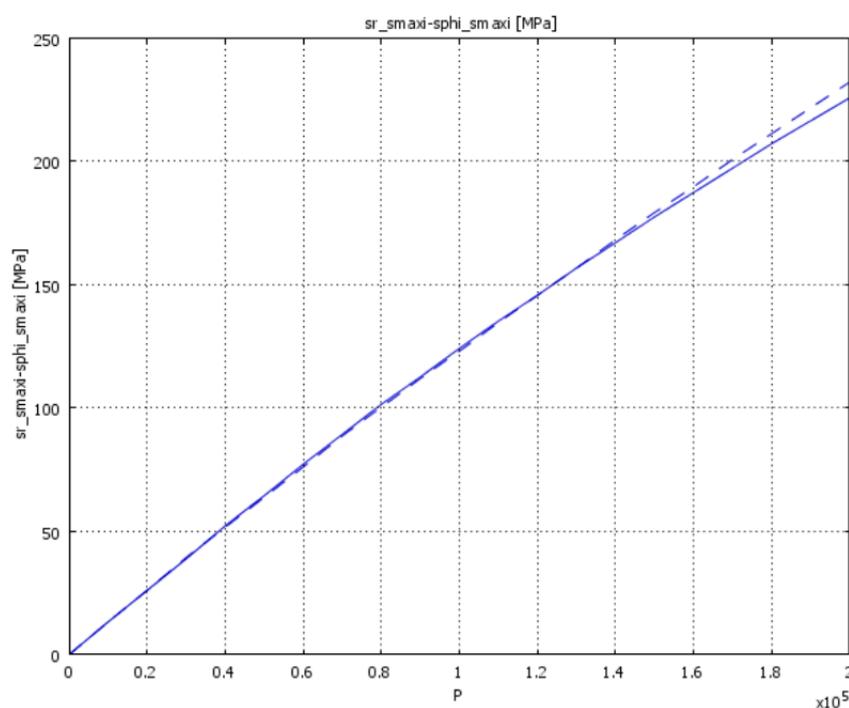


Рис. 3. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжений от приложенного давления для плоской и профилированной мембран

На рис. 4 представлены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжений для плоской мембраны толщиной 0,036 мм (сплошная линия) и профилированной мембраны (пунктирная линия).

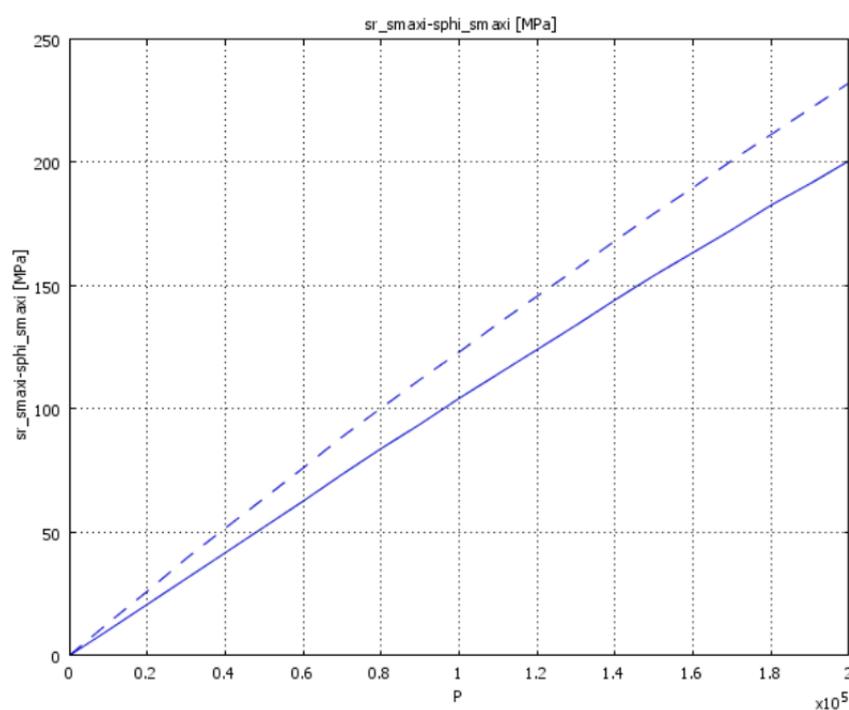


Рис. 4. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжений от приложенного давления для плоской и профилированной мембран

Для каждого случая была рассчитана чувствительность и погрешность линейности, данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип мембраны	Погрешность линейности	Чувствительность
Плоская (толщина 0,03мм)	2,88 %	1118,6
Плоская (толщина 0,036мм)	1,31 %	1001,9
Профилированная	1,62 %	1153,3

Из табл. 2 видно, что значение чувствительности профилированной мембраны с соотношением участков 3,6 к 1 значительно снизилось в сравнении с мембраной с соотношением участков 3 к 1. Для определения, при каких геометрических параметрах профилированная мембрана с соотношением широкого и узкого участков 3,6 к 1 обладает наилучшей чувствительностью, было проведено моделирование профилированной мембраны с изменением координаты ступеньки от 0,7 мм до 1 мм от центра мембраны с шагом 0,05.

Для каждого значения координаты ступеньки были построены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления 0,2 МПа.

На основании полученных данных была составлена табл. 3

Таблица 3

Координата ступеньки	Максимальное напряжение, МПа	Погрешность линейности
1	229,42	2,44
0,95	231,91	1,62
0,9	231,97	1,84
0,85	234,12	1,46
0,8	233,01	2,57
0,75	233,35	2,73
0,7	230,61	2,82

Из табл. 3 видно, что наименьшая чувствительность соответствует мембране с соотношением широкого и узкого участков 3,6 к 1, при этом максимальное напряжение, а следовательно, и чувствительность такой мембраны выше в сравнении с мембранами, имеющими другие соотношения широкого и узкого участков.

На основе полученных данных (табл. 3) была построена зависимость погрешности линейности от координаты ступеньки, результаты представлены в виде графика (рис. 5).

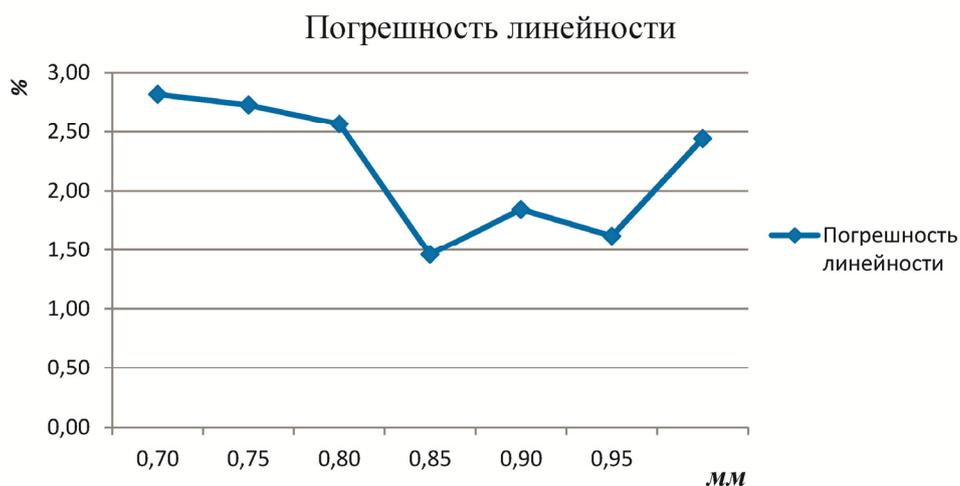


Рис. 5. Зависимость погрешности линейности профилированной мембраны от координаты ступеньки

Для сравнения мембраны профилированной с соотношением участков 3,6 к 1 и координатой ступеньки на расстоянии 0,85 мм от центра мембраны с плоской мембраной толщиной 0,03 мм и плоской мембраной 0,036 мм данные сведены в табл. 4.

Таблица 4

Тип мембраны	Погрешность линейности	Чувствительность
Плоская (толщина 0,03мм)	2,88 %	1118,6
Плоская (толщина 0,036мм)	1,31 %	1001,9
Профилированная	1,46 %	1170,1

Из табл. 4 видно, что наибольшая чувствительность соответствует профилированной мембране, при этом погрешность линейности выходного сигнала составляет порядка 1,5 %, что является хорошим показателем для полупроводникового чувствительного элемента.

Результаты и обсуждения

Минимальная погрешность линейности, порядка 1,5 %, была получена при отношении ширины участков 3,6 к 1, при данном значении максимальная чувствительность соответствует координате 0,85 мм от центра мембраны. Численное значение чувствительности профилированной мембраны с такими геометрическими параметрами составляет 1170,1, что немного больше чувствительности плоской мембраны. На рис. 6 представлен эскиз сечения профилированной мембраны с параметрами, описанными выше [3].

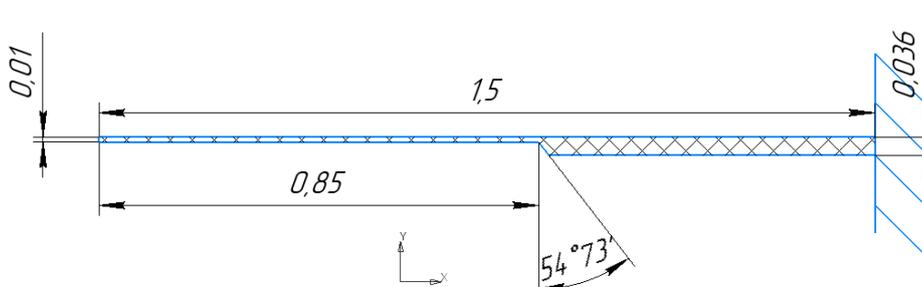


Рис. 6. Эскиз профилированной мембраны с оптимальным соотношением параметров чувствительности и погрешности линейности

Заключение

Таким образом, проведенное исследование характеристик профилированной мембраны показывает, что наилучший результат по соотношению чувствительности и линейности получен при значении 0,85 координаты ступеньки и отношении широкого и узкого участков 3,6 к 1. Чувствительность такой профилированной мембраны составила 1170,1, что на 15 % превышает чувствительность плоской мембраны, в то время как погрешность линейности составляет 1,46 %.

Список литературы

1. Shyam Aravamudhan. Development of micro/nanosensor elements and packaging techniques for oceanography. University of South Florida Scholar Commons, 2006.
2. Рыблова Е. А., Волков В. С. Оптимизация параметров полупроводникового чувствительного элемента в виде круглой мембраны с целью повышения чувствительности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 39–46. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-5
3. Патент RU 2 732 839 C1 Полупроводниковый преобразователь давления с повышенной точностью и чувствительностью / Волков В. С., Рыблова Е. А. ; № 2019121377 ; заявл. 09.07.2019 ; опубл. 23.09.2020.

References

1. Shyam Aravamudhan. *Development of micro/nanosensor elements and packaging techniques for oceanography*. University of South Florida Scholar Commons, 2006.
2. Ryblova E.A., Volkov V.S. Optimization of parameters of a semiconductor sensing element in the form of a round membrane in order to increase sensitivity. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(2):39–46. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-5
3. Patent RU 2 732 839 C1 Semiconductor pressure converter with increased accuracy and sensitivity. Volkov V.S., Ryblova E.A.; No. 2019121377; appl. 09.07.2019; publ. 23.09.2020. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елизавета Анатольевна Рыблова

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Elizaveta.ryblova@mail.ru

Elizaveta A. Ryblova

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Вадим Сергеевич Волков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vadimv_1978@mail.ru

Vadim S. Volkov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 625.098

doi:10.21685/2307-5538-2022-1-10

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГОЛОВЫ В АРМЕЙСКОЙ АВИАЦИИ И ПУТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

В. В. Харитонов¹, П. М. Шешегов², В. Н. Зинкин³

¹ Филиал «Взлет» Московского авиационного института (Государственного технического университета),
Ахтубинск, Астраханская область, Россия

^{2,3} Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

¹haritonovvladimir@yandex.ru, ²sheshegoff.pavel@yandex.ru, ³zinkin-vn@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью работы являлась оценка эффективности средств индивидуальной защиты головы, используемых в армейской авиации, выявление недостатков и обоснование путей их совершенствования. *Материалы и методы.* Исследовали средства защиты головы летных экипажей, которые используются в настоящее время в государственной авиации. В работе использовали субъективный метод (анкетирование) и объективный метод оценки акустической эффективности. Особое внимание было обращено на средства защиты, используемые в армейской авиации, так как вертолетный шум имеет ряд особенностей. Показаны источники и механизмы формирования вертолетного шума. *Результаты.* С помощью анкетирования выявлены звукоизолирующие, конструктивные, эксплуатационные и эргономические недостатки средств индивидуальной защиты головы. Сравнение звукоизолирующих свойств средств защиты головы с акустическими параметрами на рабочих местах показало их недостаточную эффективность, что создает риски потери слуха. *Выводы.* Даны рекомендации по улучшению передачи и восприятию звуковой информации средств защиты головы, используемых в государственной авиации, а также оценки акустической эффективности средств защиты от авиационного шума.

Ключевые слова: государственная авиация, вертолеты, источники шума, анкета, средства индивидуальной защиты головы, недостатки, рекомендации

Для цитирования: Харитонов В. В., Шешегов П. М., Зинкин В. Н. Оценка эффективности средств индивидуальной защиты головы в армейской авиации и пути их совершенствования // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 80–91. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-10

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF PERSONAL HEAD PROTECTION EQUIPMENT IN ARMY AVIATION AND WAYS TO IMPROVE THEM

V.V. Kharitonov¹, P.M. Sheshegov², V.N. Zinkin³

¹ Branch of the «Take-off» of the Moscow Aviation Institute (State Technical University),
Akhtubinsk, Astrakhan region, Russia

^{2,3} Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

¹haritonovvladimir@yandex.ru, ²sheshegoff.pavel@yandex.ru, ³zinkin-vn@yandex.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the work was to evaluate the effectiveness of personal protective equipment of the head used in army aviation, identify shortcomings and justify ways to improve them. *Materials and methods.* We investigated the means of protecting the heads of flight crews, which are currently used in state aviation. The work used a subjective

tive method (questionnaire) and an objective method for evaluating acoustic efficiency. Special attention was paid to the protective equipment used in army aviation, since helicopter noise has a number of features. The sources and mechanisms of helicopter noise formation are shown. *Results.* With the help of a questionnaire, sound-proofing, constructive, operational and ergonomic disadvantages of personal head protection equipment were identified. A comparison of the sound-proofing properties of head protection products with acoustic parameters in the workplace showed their insufficient effectiveness, which creates risks of hearing loss. *Conclusions.* Recommendations are given to improve the transmission and perception of sound information of head protection devices used in state aviation, as well as evaluating the acoustic effectiveness of aircraft noise protection equipment.

Keywords: state aviation, helicopters, noise sources, questionnaire, personal head protection equipment, disadvantages, recommendations

For citation: Kharitonov V.V., Sheshegov P.M., Zinkin V.N. Evaluation of the effectiveness of personal head protection equipment in army aviation and ways to improve them. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1): 80–91. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-10

Актуальность

Вертолеты представляют разновидность воздушных судов (ВС), входящих в состав государственной авиации. В настоящее время вертолеты составляют основу армейской авиации (АА), которая является родом войск в составе всех видов войск Вооруженных сил РФ [1–3].

Вертолеты имеют схожую конфигурацию. Основу их составляет фюзеляж, в переднем отсеке которого располагается экипаж (от 1 до 3 человек). Силовая установка вертолетов размещена над фюзеляжем. Конструктивные особенности данного типа ВС и наличие нескольких источников шума способствуют образованию внутри фюзеляжа интенсивного шума, инфразвука и общей вибрации, величины которых в большинстве случаев превышают предельно допустимые уровни (ПДУ). Шум, образующийся при эксплуатации вертолетов, по механизму многообразен, поэтому имеет сложный спектральный состав [2, 3].

В авиации шум и инфразвук занимают важное место среди вредных факторов труда. Они способны снижать работоспособность и создавать высокий риск здоровью, что требует проведения комплекса мероприятий по профилактике вредного действия механических факторов и снижения риска здоровью [4–6]. Особое место в этой системе отводится средствам индивидуальной защиты (СИЗ) от шума. В настоящее время экипажи вертолетов в обязательном порядке при выполнении полетных заданий используют защитные шлемы (ЗШ). ЗШ – это индивидуальное средство защиты летного состава. Они предназначены для механической защиты головы, органа зрения и поддержания связи с руководителями полетов и членами экипажа. В настоящее время в АА наиболее часто используется ЗШ-7В.

Использование СИЗ головы экипажами надо рассматривать как ведущий способ защиты органа слуха от вредных последствий действия шума, снижения риска развития тугоухости у летного состава и предупреждение его дисквалификации [7–9].

Цель работы: оценить эффективность средств индивидуальной защиты головы, используемых в АА, выявить недостатки и обосновать пути их совершенствования.

Методы исследования

Для оценки акустической эффективности, конструктивных и эргономических качеств СИЗ головы, применяемых в армейской авиации, использовали субъективный и объективный методы. В первом случае это было анкетирование летного состава (табл. 1).

В анкетировании приняли участие 47 членов экипажей (летчики и штурманы) различных видов авиации: дальняя авиация (ДА) – 4 человека, военно-транспортная авиация (ВТА) – 13 человек, оперативно-тактическая авиация (ОТА) – 17 человек, армейская авиация (АА) – 13 человек. Анкета позволяла субъективно оценить качество восприятия поступающей речевой информации (через наушники) и разборчивость речи в зависимости от уровня шума в кабине ВС и от используемого СИЗ головы при работе силовых установок ВС, а также выявить их конструктивные и эргономические недостатки.

Для оценки акустической эффективности СИЗ головы на первом этапе измеряли акустические параметры в кабине и салоне вертолета с помощью цифрового шумомера SVAN-945A (анализатор спектра 1 класса) и микрофона типа GRAS 40AZ. Шумомер предназначен для акустических измерений, мониторинга шума окружающей среды и оценки уровней шума и инфразвука на рабочих местах в соответствии с ОТТ ВВС-2015, ГОСТ 20296-2014 (Самолеты и

вертолеты гражданской авиации. Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажа и методы измерения шума), санитарно-эпидемиологическими правилами (СанПиН 2.2.4.3359-16), санитарными нормами (СН 2.2.4/2.1.8.562–96). Микрофон GRAS 40AZ обладает линейной характеристикой в нормируемом частотном диапазоне. В диапазоне частот 1–10 000 Гц погрешность не превышает 1 дБ; 10–20 кГц погрешность не превышает 2 дБ. При обработке результатов в качестве нормативных документов, регламентирующих уровни акустической нагрузки на авиационных специалистов, использовали вышеперечисленные документы.

Таблица 1

Анкета

Вопрос	Оценка			Примечание
	хорошая	удовлетворительная	плохая	
Тип воздушного судна				
Марка защитного шлема				
Качество восприятия поступающей информации (через наушники) в зависимости от уровня шума в кабине: – двигатель не работает – при прогреве двигателя – при взлете – во время полета				
Разборчивость речи				
Имеются ли затруднения восприятия согласных: – звонких согласных (б, в, г, д, ж, з, й, л, м, н, р) – глухих согласных (к, п, с, т, ф, х, ц, ч, ш, щ)				
Качество передачи информации (через ларингофоны) в зависимости от уровня шума в кабине: – двигатель не работает – при прогреве двигателя – при взлете – во время полета				

Примечания. 1. Требуется ли усовершенствование защитного шлема: да/нет.
2. Если требуется усовершенствование, то в чем конкретно (написать).

На втором этапе оценку акустической эффективности СИЗ головы от шума проводили методом сравнения параметров шума внутри вертолета с ПДУ в октавных полосах для вертолетов согласно ОТТ ВВС-2015, а затем полученную разницу сравнивали с акустической эффективностью СИЗ от шума в октавных полосах со среднегеометрической частотой 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц¹. Для оценки акустической эффективности использовали ЗШ-7, который наиболее часто используется членами экипажей в АА, и комплект СИЗ-1, предназначенный для специалистов инженерно-авиационной службы.

Источники вертолетного шума и его особенности

Анализ вертолетного шума при различных режимах работы силовой установки свидетельствует о наличии акустических колебаний в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 2 до 8000 Гц. Такой шум нужно классифицировать как широкополосный шум с инфразвуковой составляющей. Широкополосный шум с максимумом в области низких

¹ ГОСТ Р 12.4.213-99 ССБТ. Средства индивидуальной защиты органа слуха. Противошумы. Упрощенный метод измерения акустической эффективности противошумных наушников для оценки качества.

и средних частот указывает на газодинамический характер его происхождения и обусловлен работой турбин [2, 5].

В табл. 2 представлены уровни звукового давления и уровни шума при эксплуатации вертолета Ми-8 при различных режимах работы силовой установки.

Таблица 2

Уровни звукового давления и уровни шума при эксплуатации вертолета Ми-8 при различных режимах работы силовой установки

Мощность работы двигателя	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрической частотой (Гц)									Уровень звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Работа силовой установки на режиме запуск двигателя										
18 %	85,5	84,2	88,0	87,3	88,3*	90,6*	82,3	75,6	75,1	91
Работа силовой установки на режиме «малый газ»										
68–71 %	90,6	89,0	89,0	87,8	87,2	88,7*	85,5*	78,6	74,6	91
Работа силовой установки в режиме «правой коррекции»										
83–83 %	93,5	100,1	96,7*	95,3*	91,7*	93,7*	90,9*	80,4*	75,8	97
ПДУ	113	103	96	91	88	85	83	81	79	90

Примечание: * – превышение ПДУ для 8-часового рабочего дня согласно ГОСТ 20296 – 2014 «Самолеты и вертолеты гражданской авиации. Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажей и методы измерения шума».

Из табл. 2 следует, что УЗД и уровни звука внутри вертолета зависят от мощности работы двигателя. Они достигают максимальных значений при работе силовой установки в режиме «правой коррекции». Большую часть времени (95 %) во время полета личный состав подвергается шуму при работе двигателей в режиме «правой коррекции» и параметры шума практически не меняются, поэтому вертолетный шум нужно считать постоянным. Наиболее высокие УЗД (100 дБ) приходятся на область от 31,5 до 2000 Гц с максимумом в октавной полосе 63 Гц. Поэтому такой шум классифицируется как низкочастотный. Уровень звука превышает ПДУ от 1 до 7 дБА, что соответствует вредному классу условий труда (класс 3.1– 3.2). Наличие в спектре шума дискретных сигналов с максимальной интенсивностью до 100 дБ и выше позволяет вертолетный шум классифицировать и как тональный шум, генез которого обусловлен вращением винтов.

Таким образом, к специфическим особенностям вертолетного шума можно отнести:

- широкополосный с максимумом в области низких и средних частот;
- интенсивный (до 100 дБ) и превышает ПДУ;
- постоянный и равномерный;
- сочетание с широкополосным инфразвуком;
- наличие дискретных тонов сложного генеза (гармоники и резонансы).

Особенности формирования шума при эксплуатации вертолетов позволили сформировать такое понятие, как «вертолетный шум», т.е. широкополосный высокоинтенсивный шум с максимумом спектра в области низких частот и наличием дискретных тонов [2, 3].

Исследование акустической обстановки было проведено в трех режимах: запуск двигателя, «малый газ» и режим «правой коррекции». Основным отличием всех трех режимов является мощность работы силовой установки (соответственно 18 %, 68–71 %, 83–84 %). Исследование показало зависимость интенсивного шума от мощности работы турбин, тем самым подтверждая газодинамическую природу его происхождения. Разброс УЗД в различных точках внутри вертолета является незначительным (1,5 дБ), что позволяет сделать заключение о равномерности акустического поля внутри вертолета.

Механизмы генерации вертолетного шума имеют сложный характер. В первую очередь, это обусловлено наличием нескольких источников шума, каждый из которых имеет свою природу образования шума: две турбины (газодинамический шум), трансмиссия (структурный шум), винты (винтовой шум). Во-вторых, все источники располагаются на верхней поверхности фюзеляжа и они конструктивно имеют жесткое соединение с металлическим корпусом,

что способствует образованию и проведению структурного шума во все отсеки вертолета. В-третьих, в отсеках, которые имеют свои геометрические размеры, могут формироваться резонансные явления за счет воздействия внешнего шума на корпус вертолета.

Таким образом, вертолетный шум по механизму формирования многообразен из-за наличия нескольких источников, поэтому он имеет сложный спектральный состав.

Оценка конструктивных, эксплуатационных и эргономических свойств СИЗ головы

На дополнительный вопрос, требуется ли усовершенствование защитного шлема, ответили «ДА» 32 человека (68 %). Причем почти все высказали не по одному замечанию.

Все выявленные замечания были распределены по группам:

- 1) по качеству воспринимаемой звуковой информации;
- 2) по зрительному восприятию;
- 3) по конструктивным особенностям;
- 4) по эргономическим свойствам.

Проведенный анализ в каждой группе выявленных недостатков показал следующее:

1. Замечания по качеству связи и восприятию звуковой информации отметили 40,4 % опрошенных:

- при работе системы кондиционирования воздуха (СКВ) плохое качество восприятия информации за счет шума (ЗШ-7 ВС, авиагарнитура);

- плохое качество передачи информации, необходимо активное шумоподавление (ЗШ-7 АПН, ГСШ-18 А);

- задержка в воспроизведении речи при закрытой радиосвязи (ЗШ-7 ВС);

- неразборчивость отдельных команд по самолетному переговорному устройству (СПУ) (авиагарнитура).

2. У 17 % опрошенных были замечания по зрительным восприятиям:

- подвержен механическим повреждениям светофильтр;

- появляются блики;

- преломление изображения через светофильтры.

3. Недостатки по конструктивным особенностям отметили 40,4 % опрошенных:

- малая длина шнура (ЗШ-5А, ЗШ-7АПН).

- разрушаются провода в области заголовья кресла, кабель зацепляется за подвесную штангу кресла (ЗШ-7 ВС).

- улучшить сочетание шлем-маска (ЗШ-7АПН).

- выход из строя микрофона ЗШ (ЗШ-7 ВС).

4. Эргономические недостатки отметили 63,8 % опрошенных:

- уменьшение веса и габарита ЗШ;

- уменьшить количество проводов (ЗШ-7АПН);

- доработать в ЗШ мягкой прокладкой на крепление очков ночного видения;

- более удобное оголовье (ГСШ-18 А);

- наличие мягкой амбушюры (ГСШ-18 А);

- доработка крепления для кислородной маски (ГСШ-18 А);

- снижение давления наушников на височную и ушную область, особенно при длительных полетах (ГСШ-18 А, ЗШ-5А, ЗШ-7А, КМ-32, авиагарнитура).

Таким образом, используемые СИЗ головы в государственной авиации, имеют ряд конструктивных и эргономических недоработок, которые требуют усовершенствования. Наибольшее количество замечаний было предъявлено при использовании ГСШ-18 А, используемых в ВТА и ЗШ-7 ВС.

Оценка качества восприятия и передачи звуковой и речевой информации при использовании СИЗ головы

В ДА при полетах используется ЗШ-7, у 75 % опрошенных качество восприятия поступающей информации и разборчивость речи не страдает. Качество передачи информации (через ларингофоны) и восприятие согласных 50 % отметили как хорошее, а 50 % – удовлетворительное.

В ВТА для защиты используется летный шлем, а для переговоров – авиагарнитура. В 46 % качество восприятия поступающей информации не нарушено, восприятие согласных хорошее, в 46 % – удовлетворительное, а в 8 % – плохое. Причем разборчивость речи не страдает у 77 %, 15 % отметили разборчивость речи как удовлетворительную, а 8 % – плохую. Качество передачи информации (через ларингофоны) хорошее отмечено в 31 %, удовлетворительное – у 61 %, плохое – у 8 %.

В ОТА при использовании ЗШ-5А, ЗШ-7А качество восприятия поступающей информации, разборчивость речи, восприятие согласных и качество передачи информации хорошее в 82 %, только 16 % опрошенных эти же показатели оценили удовлетворительно.

В АА используются ЗШ-7В и ЗШ-7 ВС. 69 % опрошенных отметили хорошее качество восприятия поступающей информации, хорошие разборчивость речи, восприятие согласных и качество передачи информации на всех типах ВС. В то же время 31 % отметили удовлетворительное качество восприятия информации, восприятие согласных и качество передачи информации при прогреве двигателя, при взлете и во время полета.

Таким образом, используемые СИЗ головы, используемые в государственной авиации, не полностью обеспечивают качественное восприятие и передачи звуковой информации.

Оценка акустической эффективности ЗШ-7В

В соответствии с требованиями по технике безопасности на рабочих местах, где не удастся добиться снижения шума до ПДУ, следует применять СИЗ от шума.

Защитный шлем (ЗШ-7В). В АА экипажи обеспечены СИЗ головы ЗШ-7В, одной из функций которого является защита от шума. В табл. 3 показана его акустическая эффективность [2].

Таблица 3

Сравнение шумозащитных свойств ЗШ-7В с превышением уровня звукового давления в кабине экипажей вертолетов АА

Параметр	Акустическая эффективность (дБ) ЗШ-7 в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц
	9	8	21	21	26	34	24
Превышение УЗД (Δ) над ПДУ в зависимости от типа вертолета							
Ми-8	0	4	5	9	8	0	0
Ми-35м	25	21	36	37	40	41	42
Ми-26	7	15	18	22	25	26	17
Ка-52	5	0	0	0	0	0	1
Ка-50	2	3	3	0	1	5	9
Ми-28Н	0	12	6	7	0	0	0
ПДУ (дБ)	97	91	87	85	83	81	80

Примечания: 1. ПДУ – предельно допустимый уровень (дБ) от 4 до 8 ч полета согласно ОТТ ВВС-2015. 2. Δ – превышение уровня звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами над ПДУ в кабине вертолета. 3. Жирным шрифтом выделена величина превышения (Δ) над ПДУ.

В табл. 3 показано, что ЗШ-7В обладает акустической эффективностью в звуковом диапазоне частот 125–8000 Гц от 9 до 34 дБ. В области низких частот величина звукопоглощения не превышает 9 дБ, а с увеличением частоты она возрастает и достигает максимальной величины в области высоких частот (24–34 дБ). Кроме того, в табл. 2 представлены величины превышения УЗД в кабинах вертолетов над ПДУ. В зависимости от типа вертолета величина этого параметра колеблется от 0 до 42 дБ.

Сравнительный анализ показывает, что ЗШ-7В в звуковом диапазоне 125–8000 Гц в полном объеме не защищает орган слуха от вредного и помехового действия шума. Наименьшей эффективностью ЗШ-7В обладает при полетах на вертолетах, особенно Ми-35м и Ми-26.

Кроме того, он недостаточно эффективен на частотах от 500 Гц и ниже практически во всех типах вертолетов, что будет оказывать помеховое действие на речевой контакт между членами экипажа и руководителем полета.

Таким образом, ЗШ-7В, используемый в АА как СИЗ от шума, недостаточно эффективно защищает орган слуха от некомпенсированного действия вертолетного шума. Данных по эффективности ЗШ от инфразвука нет, так как работа в этом направлении не проводилась. Отсутствие и недостаточная эффективность СИЗ от шума и инфразвука для экипажей АА требует проведения работ по совершенствованию СИЗ. Поэтому для поддержания на высоком уровне работоспособности и снижения риска здоровью необходимо использовать другие мероприятия по профилактике вредного действия вертолетного шума [10–12].

Комплект СИЗ-1. Приказом Министра обороны РФ № 202 от 22.04.2016 приняты на снабжение Вооруженных сил комплекты средств индивидуальной защиты СИЗ-1 и СИЗ-2. Они предназначены для защиты органа слуха инженерно-технического состава от неблагоприятного влияния высокоинтенсивного шума на всех этапах эксплуатации авиационной техники в любое время года. Их отличие состоит в том, что комплект СИЗ-2 обеспечивает двустороннюю связь технического персонала с командиром ВС при подготовке к полету. В табл. 4 представлены результаты сравнения шумозащитных свойств комплекта СИЗ-1 с превышением уровня звукового давления в кабине салона вертолетов АА.

Таблица 4

Сравнение шумозащитных свойств комплекта СИЗ-1 с превышением уровня звукового давления в кабине салона вертолетов АА (см. табл 2)

Параметр	Акустическая эффективность (дБ) ЗШ-7 в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц
	20	29	40	42	38	35	36
Превышение УЗД (Δ) над ПДУ в зависимости от типа вертолета							
Ми-8	0	4	5	9	8	0	0
Ми-35м	25	21	36	37	40	41	42
Ми-26	7	15	18	22	25	26	17
Ка-52	5	0	0	0	0	0	1
Ка-50	2	3	3	0	1	5	9
Ми-28Н	0	12	6	7	0	0	0
ПДУ (дБ)	97	91	87	85	83	81	80

В табл. 4 показано, что комплект СИЗ-1 обладает акустической эффективностью в звуковом диапазоне частот 125–8000 Гц от 20 до 42 дБ. В области низких частот (125–250 Гц) величина звукопоглощения составляет 20–29 дБ, а с увеличением частоты она возрастает и достигает максимальной величины в области 500 и 1000 Гц (соответственно 40 и 42 дБ). Кроме того, в табл. 4 представлены величины превышения УЗД в кабинах вертолетов над ПДУ. В зависимости от типа вертолета величина этого параметра колеблется от 0 до 42 дБ.

Сравнительный анализ превышений УЗД в салоне с акустической эффективностью комплекта СИЗ-1 показывает, что последний в звуковом диапазоне 125–8000 Гц практически в полном объеме защищает орган слуха от вредного и помехового действия шума во всех типах вертолетов, за исключением Ми-35м. В последнем шум превышает акустическую эффективность комплекта от 2 до 6 Гц.

Таким образом, комплект СИЗ-1 будет эффективно защищать орган слуха от некомпенсированного действия вертолетного шума у лиц, находящихся в салоне. Комплект СИЗ-2 по своим звукоизолирующим свойствам не отличается от комплекта СИЗ-1.

Однако известно, что в условиях воздействия авиационного шума защита органа слуха путем перекрытия воздушного пути поступления звука не всегда обеспечивает надежность безопасности персонала. Это обусловлено тем, что в спектре авиационного шума, особенно при работе силовых установок ВС, присутствуют низкочастотные и инфразвуковые частоты, превышающие ПДУ. Они при уровнях выше 100 дБ способны активировать костный путь доставки звука к звуковоспринимающим структурам внутреннему уху. Надо учитывать, что УЗД

в области инфразвука внутри вертолета достигают 100 дБ, а в низкочастотном диапазоне – (31,5–125 Гц) 90–122 дБ. Кроме того, надо учитывать, что существующие СИЗ от шума, в том числе используемые в АА, не эффективны в данном диапазоне частот [2, 13, 14].

Пути совершенствования акустической эффективности СИЗ от вертолетного шума

Использование наушников, оборудованных гарнитурой связи, в ряде случаев не решает серьезные затруднения в передаче звуковой информации воздушным путем. Это может быть обусловлено следующими обстоятельствами [15, 16].

Процесс звукопроведения является чисто механическим и осуществляется путем воздушной или костной проводимости. Воздушная проводимость осуществляется по воздуху посредством анатомических структур наружного и среднего уха. Костная проводимость – это передача звуковой энергии через ткани головы к подвижным звукопроводящим элементам улитки. Костная проводимость отличается от воздушной проводимости только тем, что она передает звуковые колебания не через воздушную среду, а используя контактное вибрационное воздействие на кость. Нужно понимать, что никакой неестественности здесь нет.

Механизмы костно-тканевой передачи звука хорошо изучены. Установлено, что характер проведения звуковых колебаний по костям черепа не одинаков при разной частоте. Костное проведение оказывается гораздо более эффективным для слухового восприятия, когда звуковые сигналы передаются прямо на кости черепа через вибратор, установленный на голове (преимущественно в области сосцевидной или скуловой кости). Разница в импедансе костей и жидкостей внутреннего уха небольшая, что способствует передаче звуков практически без изменения их амплитудно-частотных характеристик. В звуковых системах с костной проводимостью используются хорошо изученные возможности человеческого тела, и в сравнении с обычными наушниками изменен лишь способ доставки звука, который воспринимается обычными органами слуха в обход ушных раковин.

Костное проведение звуков, по сути, определяет тот лимит, при котором человеческое ухо может быть защищено от окружающих шумов различными устройствами для защиты слуха (в том числе СИЗ от шума). Закрытие ушей уменьшает поступление звуковой энергии через наружный слуховой проход, но не оказывает никакого эффекта на передачу звуков путем костного проведения. Выключение звукопроводящих воздушных путей из процесса слухового восприятия не сопровождается полной потерей слуха, оно лишь приводит к повышению порогов слышимости. При плотной закупорке наружного слухового прохода у человека удается снизить остроту слуха не более чем на 40 дБ. Это соответствует усиливающей способности звукопроводящей системы наружного и среднего уха. Наблюдения за больными с изолированным повреждением звукопроводящего аппарата показывают, что при этом не наступает глухота, так как звук может доставляться к внутреннему уху непосредственно через кости черепа и покрывающие его ткани. Это есть костно-тканевое звукопроведение.

Механические процессы в улитке и кодирование их в виде электрических ответов, отражающих импульсацию в сенсорном эпителии и нервных структурах, при костном проведении аналогичны таковым при воздушном проведении тех же стимулов. Уровень звуковых колебаний, передаваемых костно-тканевым путем, на 20–30 дБ меньше уровня, воспринимаемого ухом при передаче воздушным путем.

Итак, звукопроведение до волосковых клеток спирального органа является механическим процессом и осуществляется двумя путями – воздушным и костно-тканевым. Большим преимуществом последнего пути является возможность осуществлять передачу информации на большое расстояние и скрытым путем. Использование гаджета на основе костной проводимости является надежным каналом получения звуковой информации, расширяя возможности человека для получения одновременно информации из окружающей среды, а значит снижает ненадежность действия оператора в условиях действия шума [17].

С появлением цифровых технологий открываются большие возможности применения костного звукопроведения в СИЗ головы для государственной авиации. Для этого необходимо усовершенствовать ЗШ, которые используют летные экипажи. Кроме того, необходимо салоны, особенно вертолетов, оборудовать аппаратурой, позволяющей использовать личному составу костную проводимость во время работы силовой установки [2].

Существующие методики оценки акустической эффективности СИЗ от шума предназначены для исследования в диапазоне от 125 до 8000 Гц. Одной из особенностей авиационного шума является высокая интенсивность, широкополосность, наличие инфразвуковой составляющей. Кроме того, нередко максимум спектра шума приходится на частоты ниже 250 Гц. Имеющиеся СИЗ от шума в полном объеме не обеспечивают необходимую акустическую эффективность для безопасности авиационных специалистов, особенно инженерно-технический состав. Для решения этой проблемы предлагаем следующее.

Во-первых, при действии низких частот использование эквивалентного уровня звука не оправдано, так как шкала «А» существенно занижает уровень звука. Для устранения этого пробела в санитарных нормах по инфразвуку вводится дополнительный нормируемый показатель – общий эквивалентный уровень инфразвука, который регистрируется в диапазоне частот от 1,6 до 40 Гц. Однако этот параметр не включает уровни звукового давления в низкочастотной области в октавных полосах с центральными частотами 63, 125 и 250 Гц, т.е. максимальные УЗД авиационного шума не входят в интегральные нормируемые показатели акустического воздействия. В связи с этим в качестве критерия использования СИЗ необходимо применять не нормируемый показатель – уровень звукового давления во всем диапазоне частот, регистрируемый по шкале «Линейная» [18]. Предложен метод расчета интегральной оценки акустической эффективности СИЗ от авиационного шума, позволяющий оценить акустическую эффективность шумозащитных наушников и шумозащитного шлема, в том числе при их совместном использовании [19].

Во-вторых, при высоких уровнях звукового давления рекомендовано использовать комплекс специальных средств защиты, в который должны входить противошумный шлем и противошумный жилет. Это новый класс технических СИЗ для защиты человека от аурального и экстрааурального действия высокоинтенсивного шума [20].

В-третьих, необходимо продолжить разработку новых СИЗ от авиационного шума, обладающих достаточной эффективностью в области низких и инфразвуковых частот.

Заключение

Исследование СИЗ головы, используемых летным составом государственной авиации, позволило выявить ряд недостатков, что требует их усовершенствования.

Использование костной проводимости является перспективным методом повышения эффективности передачи и восприятия звуковой информации в условиях действия шума как в кабине, так и в салоне вертолета. Необходимо совершенствовать методики по оценке акустической эффективности средств защиты от авиационного шума.

Для поддержания на высоком уровне работоспособности летного состава и снижения риска их здоровью необходимо использовать и другие мероприятия по профилактике вредного действия авиационного шума [21–23].

Список литературы

1. Стоянович И. С. Измерение шума и вибрации в кабине вертолета Ми-8 // *Vojnotehncki glasnik. Military technical courier*. 2016. Vol. 64, № 1. P. 176–195.
2. Харитонов В. А., Мищенко А. А., Пирожков М. В. [и др.]. Методические подходы для оценки акустической обстановки внутри вертолета Ми-8 // *Проблемы безопасности полетов*. 2020. № 10. С. 39–59.
3. Иванов Н. И. Вертолеты. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник. 3-е изд. перераб и доп. М. : Логос, 2013. С. 387–388.
4. Шешегов П. М. Профессиональные риски у авиационных специалистов Военно-воздушных сил // *Проблема безопасности полетов*. 2016. № 2. С. 3–25.
5. Солдатов С. К., Зинкин В. Н., Богомолов А. В. [и др.]. Фундаментальные и прикладные аспекты авиационной медицинской акустики. М. : Физматлит, 2019. 216 с.
6. Зинкин В. Н., Шешегов П. М. Современные проблемы шума в авиации // *Проблемы безопасности полетов*. 2014. № 5. С. 3–25.
7. Zhdanko I. M., Zinkin V. N., Soldatov S. K. [et al.]. Fundamental and applied aspects of preventing the adverse effects of aviation noise // *Human Physiology*. 2016. Vol. 42, № 7. P. 705–714.

8. Зинкин В. Н., Миронов В. Г., Солдатов С. К., Шешегов П. М. Особенности патологического действия авиационного шума на орган слуха инженерно-технического состава авиации // Российская оториноларингология. 2007. № 6. С. 69–74.
9. Харитонов В. В., Жданько И. М., Филатов В. Н., Шешегов П. М. Требования к средствам индивидуальной защиты от шума для специалистов инженерно-авиационной службы государственной авиации // Проблемы безопасности полетов. 2020. № 6. С. 12–28. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=43102218&selid=43102226>
10. McKinley R., Bjorn V., Hall J. Improved Hearing Protection for Aviation Personnel. 2005. In New Directions for Improving Audio Effectiveness (pp. 13-1 – 13-12). Meeting Proceedings RTO-MP-HFM-123, Paper 13. Neuilly-sur-Seine, France. URL: <http://www.rto.nato.int/abstracts.apa.html> (дата обращения: 12.01.2017).
11. Солдатов С. К., Богомолов А. В., Зинкин В. Н., Драган С. П. Проблемы обеспечения акустической безопасности персонала авиационной промышленности // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 10. С. 58–60.
12. Зинкин В. Н., Шешегов П. М. Авиационный шум: риск нарушения здоровья человека и меры профилактики // Защита от повышенного шума и вибрации : сб. докл. VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. СПб., 2017. С. 493–521.
13. Харитонов В. А., Зинкин В. Н., Драган С. П. Динамика акустической обстановки в кабине экипажа воздушного судна // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 20–29.
14. Зинкин В. Н., Шешегов П. М., Сливина Л. П. Обоснование выбора средств индивидуальной защиты для инженерно-авиационных специалистов государственной авиации // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 7. С. 54–59.
15. Шешегов П. М., Жданько И. М., Филатов В. Н., Зинкин В. Н. Костная проводимость звука и ее возможности для скрытой передачи речевой информации // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 9–10 (135–136). С. 111–119.
16. Шешегов П. М., Зинкин В. Н. Костная проводимость звука и ее возможности // Защита от повышенного шума и вибрации : сб. докл. VII Всерос. конф. с междунар. участием. СПб., 2019. С. 765–780.
17. Зинкин В. Н., Солдатов С. К., Шешегов П. М. [и др.]. Шум как фактор риска снижения работоспособности и профессиональной надежности авиационных специалистов // Проблемы безопасности полетов. 2014. № 8. С. 3–28.
18. Драган С. П. Современные проблемы оценки акустической эффективности средств индивидуальной защиты от шума // Системный анализ в медицине (САМ 2016) : материалы X Междунар. науч. конф. Благовещенск, 2016. С. 171–175.
19. Драган С. П., Зинкин В. Н., Богомолов А. В. [и др.]. Акустической эффективности средств защита от шума // Медицинская техника. 2013. № 3. С. 34–36.
20. Зинкин В. Н., Солдатов С. К., Ахметзянов И. М. [и др.]. Методология исследования эффективности средств индивидуальной защиты от шума в расширенном частотном диапазоне // Безопасность жизнедеятельности. 2013. № 7. С. 2–8.
21. Сливина Л. П., Куклин Д. А., Матвеев П. В. [и др.]. Инфразвук и низкочастотный шум как вредные производственные факторы // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 2. С. 24–30.
22. Шешегов П. М., Зинкин В. Н., Сливина Л. П. Авиационный шум как ведущий фактор, влияющий на заболеваемость и профессиональные риски у инженерно-технического состава // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52, № 3. С. 62–68.
23. Шешегов П. М., Зинкин В. Н., Сливина Л. П. Авиационный шум: особенности формирования и профилактики нейросенсорной тугоухости у авиационных специалистов Военно-воздушных сил // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53, № 3. С. 49–56.

References

1. Stoyanovich I.S. Measurement of noise and vibration in the cockpit of the Mi-8 helicopter. *Vojnotehncki glasnik. Military technical courier*. 2016;64(1):176–195.
2. Kharitonov V.A., Mishchenko A.A., Pirozhkov M.V. [et al.]. Methodological approaches for assessing the operational situation inside the Mi-8 helicopter. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2020;(10):39–59. (In Russ.)
3. Ivanov N.I. *Vertolety. Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom: uchebnyk = Helicopters. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control : textbook*. 3rd ed. rev. and suppl. Moscow: Logos, 2013:387–388. (In Russ.)
4. Sheshegov P.M. Professional risks of aviation specialists of the Air Force. *Problema bezopasnosti poletov = The problem of flight safety*. 2016;(2):3–25. (In Russ.)

5. Soldatov S.K., Zinkin V.N., Bogomolov A.V. [et al.]. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty aviatsionnoy meditsinskoy akustiki = Fundamental and applied aspects of aviation medical acoustics*. Moscow: Fizmatlit, 2019:216. (In Russ.)
6. Zinkin V.N., Sheshegov P.M. Modern problems of noise in aviation. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2014;(5):3–25. (In Russ.)
7. Zhdanko I.M., Zinkin V.N., Soldatov S.K. [et al.]. Fundamental and applied aspects of preventing the adverse effects of aviation noise. *Human Physiology*. 2016;42(7):705–714.
8. Zinkin B.N., Mironov V.G., Soldatov S.K., Sheshegov P.M. Features of the pathological effect of aviation noise on the hearing organ of aviation engineering personnel. *Rossiyskaya otorinolaringologiya = Russian otorhinolaryngology*. 2007;(6):69–74. (In Russ.)
9. Kharitonov V.V., Zhdan'ko I.M., Filatov V.N., Sheshegov P.M. Requirements for means of individual noise protection for specialists of the engineering and aviation service of state aviation. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2020;(6):12–28. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=43102218&selid=43102226>
10. McKinley R., Bjorn V., Hall J. *Improved Hearing Protection for Aviation Personal. 2005. In New Directions for Improving Audio Effectiveness (pp. 13-1 – 13-12). Meeting Proceedings RTO-MP-HFM-123, Paper 13*. Neuilly-sur-Seine, France: Available at: <http://www.rto.nato.int/abstracts.apa.html> (accessed 12.01.2017).
11. Soldatov S.K., Bogomolov A.V., Zinkin V.N., Dragan S.P. Problems of ensuring acoustic safety of aviation industry personnel. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Occupational safety in industry*. 2014;(10):58–60. (In Russ.)
12. Zinkin V.N., Sheshegov P.M. Aviation noise: the risk of human health disorders and preventive measures. *Zashchita ot povyshennogo shuma i vibratsii: sb. dokl. VI Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem = Protection from increased noise and vibration : collection of reports VI All-Russian Scientific and practical conference with international participation*. Saint Petersburg, 2017:493–521. (In Russ.)
13. Kharitonov V.A., Zinkin V.N., Dragan S.P. Dynamics of the acoustic situation in the cockpit of an aircraft. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(2):20–29. (In Russ.)
14. Zinkin V.N., Sheshegov P.M., Slivina L.P. Justification of the choice of personal protective equipment for engineering and aviation specialists of state aviation. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Occupational safety in industry*. 2020;(7):54–59. (In Russ.)
15. Sheshegov P.M., Zhdan'ko I.M., Filatov V.N., Zinkin V.N. Bone conduction of sound and its possibilities for hidden transmission of speech information. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu = Issues of defense technology. Ser. 16: Technical means of countering terrorism*. 2019;(9–10):111–119. (In Russ.)
16. Sheshegov P.M., Zinkin V.N. Bone conduction of sound and its capabilities. *Zashchita ot povyshennogo shuma i vibratsii: sb. dokl. VII Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem = Protection from increased noise and vibration : collection of reports of the VII All-Russian Conference with international participation*. Saint Petersburg, 2019:765–780. (In Russ.)
17. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Sheshegov P.M. [et al.]. Noise as a risk factor for reducing the efficiency and professional reliability of aviation specialists. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2014;(8):3–28. (In Russ.)
18. Dragan S.P. Modern problems of evaluating the acoustic effectiveness of means of individual noise protection. *Sistemnyy analiz v meditsine (SAM 2016): materialy X Mezhdunar. nauch. konf. = System analysis in medicine (SAM 2016) : materials of the X International Scientific Conference*. Blagoveshchensk, 2016:171–175. (In Russ.)
19. Dragan S.P., Zinkin V.N., Bogomolov A.V. [et al.]. Acoustic efficiency of means of noise protection. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*. 2013;(3):34–36. (In Russ.)
20. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Akhmetzyanov I.M. [et al.]. Methodology for investigating the effectiveness of personal protective equipment against noise in the extended frequency range. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Life safety*. 2013;(7):2–8. (In Russ.)
21. Slivina L.P., Kuklin D.A., Matveev P.V. [et al.]. Infrasound and low-frequency noise as harmful production factors. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Occupational safety in industry*. 2020;(2):24–30. (In Russ.)
22. Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Slivina L.P. Aviation noise as a leading factor affecting morbidity and occupational risks in engineering and technical personnel. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina = Aerospace and environmental medicine*. 2018;52(3):62–68. (In Russ.)
23. Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Slivina L.P. Aviation noise: features of formation and prevention of sensorineural hearing loss in aviation specialists of the Air Force. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina = Aerospace and environmental medicine*. 2019;53(3):49–56. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Васильевич Харитонов

кандидат технических наук,
доцент кафедры испытаний
летательных аппаратов,
филиал «Взлет» Московского
авиационного института
(Государственного технического университета)
(Россия, Астраханская область, г. Ахтубинск,
ул. Добролюбова, 5)
E-mail: haritonovvladimir@yandex.ru

Vladimir V. Kharitonov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of aircraft testing,
Vzlet Branch of the Moscow Aviation Institute
of the State Technical University
(5 Dobrolyubova street, Akhtubinsk,
Astrakhan region, Russia)

Павел Михайлович Шешегов

доктор медицинских наук,
профессор кафедры профильных
гигиенических дисциплин,
Волгоградский государственный
медицинский университет
(Россия, г. Волгоград, Площадь павших борцов, 1)
E-mail: sheshegoff.pavel@yandex.ru

Pavel M. Shishegov

Doctor of medical sciences,
professor of the sub-department
of specialized hygienic disciplines,
Volgograd State Medical University
(1 Fallen Fighters Square, Volgograd, Russia)

Валерий Николаевич Зинкин

доктор медицинских наук, профессор,
консультант кафедры профильных
гигиенических дисциплин,
Волгоградский государственный
медицинский университет
(Россия, г. Волгоград, Площадь павших борцов, 1)
E-mail: zinkin-vn@yandex.ru

Valery N. Zinkin

Doctor of medical sciences, professor,
consultant of the sub-department of specialized hy-
gienic disciplines,
Volgograd State Medical University
(1 Fallen Fighters Square, Volgograd, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

УДК 623.746.4-519

doi:10.21685/2307-5538-2022-1-11

ПОДСИСТЕМА СВЯЗИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Н. Баянбай¹, К. А. Ожикенов², В. В. Шерстнев³, О. Е. Безбородова⁴, О. Н. Бодин⁵

^{1,2} Казахский национальный исследовательский университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

^{3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ bayanbay_nur@mail.ru, ² k.ozhikenov@satbayev.university, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ ot@pnzgu.ru, ⁵ bodin_o@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается построение на основе принципа иерархии подсистемы связи мобильного телемедицинского комплекса, оснащенного гетерогенной группой беспилотных воздушных судов и функционирующего в условиях ЧС. *Материалы и методы.* Предложены три уровня радиосвязи: верхний уровень соответствует дальней (космической) радиосвязи, средствами которой оснащается мобильный телемедицинский комплекс, средний уровень соответствует радиосвязи средней дальности, средствами которой оснащаются беспилотное воздушное судно, координирующее полетное задание гетерогенной группы беспилотных воздушных судов и беспилотные воздушные судна гетерогенной группы; нижний уровень соответствует ближней радиосвязи, средствами которой оснащается беспилотное воздушное судно гетерогенной группы и малоподвижные объекты в зоне ЧС. Рассмотрены структурные схемы и приведены характеристики дальней, средней и ближней радиосвязи. *Результаты.* Показано, что предложенная организация подсистемы связи мобильного телемедицинского комплекса, оснащенного гетерогенной группой беспилотных воздушных судов и функционирующего в условиях ЧС, позволяет функционально распределить задачи, решаемые отдельными беспилотными воздушными судами гетерогенной группы, и затем интегрировать полученные результаты. *Вывод.* По мнению авторов, построение на основе принципа иерархии подсистемы связи мобильного телемедицинского комплекса, оснащенного гетерогенной группой беспилотных воздушных судов и функционирующего в условиях ЧС, позволяет решать ресурсоемкие и сложные задачи в медицине и при ликвидации последствий ЧС.

Ключевые слова: мобильный телемедицинский комплекс, гетерогенная группа беспилотных воздушных судов, блоки дальней, средней и ближней радиосвязи

Для цитирования: Баянбай Н., Ожикенов К. А., Шерстнев В. В., Безбородова О. Е., Бодин О. Н. Подсистема связи системы управления беспилотных воздушных судов в условиях чрезвычайных ситуаций // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 92–99. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-11

COMMUNICATION SUBSYSTEM OF CONTROL SYSTEMS OF UNMANNED AIRCRAFT UNDER EMERGENCY CONDITIONS

N. Bayanbay¹, K.A. Ozhikenov², V.V. Sherstnev³, O.E. Bezborodova⁴, O.N. Bodin⁵

^{1,2} K.I. Satpayev Kazakh National Research University, Almaty, Kazakhstan

^{3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

¹ bayanbay_nur@mail.ru, ² k.ozhikenov@satbayev.university, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ ot@pnzgu.ru, ⁵ bodin_o@inbox.ru

Abstract. Background. The article is devoted to the construction on the basis of the principle of the hierarchy of the communication subsystem of a mobile telemedicine complex equipped with a heterogeneous group of unmanned aerial vehicles and functioning in emergency conditions. **Materials and methods.** Three levels of radio communication are proposed: the upper level corresponds to long-range (space) radio communication, with the means of which a mobile telemedicine complex is equipped, the middle level corresponds to medium-range radio communication, with the means of which an unmanned aerial vehicle is equipped, coordinating a flight task of a heterogeneous group of unmanned aerial vehicles and unmanned aerial vehicles of a heterogeneous group; the lower level corresponds to short-range radio communications, the means of which are equipped with an unmanned aircraft of a heterogeneous group and sedentary objects in the emergency zone. Structural diagrams are considered and characteristics of long-range, medium and short-range radio communications are given. **Results.** It is shown that the proposed organization of the communication subsystem of a mobile telemedicine complex, equipped with a heterogeneous group of unmanned aerial vehicles and operating in emergency conditions, makes it possible to functionally distribute tasks solved by individual unmanned aerial vehicles of a heterogeneous group, and then integrate the results obtained. **Conclusion.** According to the authors, the construction on the basis of the principle of the hierarchy of the communication subsystem of a mobile telemedicine complex equipped with a heterogeneous group of unmanned aerial vehicles and operating in emergency conditions allows solving resource-intensive and complex problems in medicine and in the elimination of the consequences of emergencies.

Keywords: mobile telemedicine complex, heterogeneous group of unmanned aerial vehicles, long-range, medium and short-range radio communication units

For citation: Bayanbay N., Ozhikenov K.A., Sherstnev V.V., Bezborodova O.E., Bodin O.N. Communication subsystem of control systems of unmanned aircraft under emergency conditions. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):92–99. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-11

Постановка проблемы

Подсистема связи мобильного телемедицинского комплекса (МТМК), оснащенного гетерогенной группой (ГГ) беспилотных воздушных судов (БВС), имеет первостепенное значение в условиях ЧС при проведении поиско-спасательных работ (ПСР) и оказании экстренной медицинской помощи (ЭМП) пострадавшим. Ее основной задачей является бесперебойное обеспечение передачи данных при измерении, мониторинге, управлении и контроле (ИМУК). Особенностью функционирования МТМК в условиях ЧС является проведение телемедицинских консультаций в режиме видеоконференций для оказания врачебной помощи на расстоянии, что обуславливает необходимость использования широкополосных каналов связи и видеоаппаратуры.

К недостаткам подсистемы связи существующих МТМК относятся:

- недостаточная пропускная способность сетей связи, организуемых с помощью имеющихся в их составе средств и комплексов связи;
- трудности обеспечения связи между абонентами различных сетей из-за использования в них разнотипных оконечных средств с различными алгоритмами работы;
- невозможность оперативного проведения видеоконференций, что снижает эффективность оказания медицинской помощи.

Целью статьи является построение подсистемы связи системы управления гетерогенной группой беспилотных воздушных судов в условиях ЧС.

Материалы и методы

Применение гетерогенной группы беспилотных воздушных судов (ГГ БВС) открывает новые перспективы при решении ресурсоемких и сложных задач в медицине и при ликвидации последствий ЧС [1, 2]. ГГ БВС представляет собой совокупность совместно и согласованно действующих роботов, решающих общие задачи для достижения общей цели [3]. Фактически ГГ БВС является объединением функциональных возможностей роботов, составляющих группу. Одним из главных преимуществ ГГ БВС является возможность достижения синергетического эффекта, состоящего в существенном увеличении функционального потенциала группы по сравнению с отдельно взятыми единицами мобильных роботов [4].

Далее рассмотрим систему управления ГГ БВС в условиях ЧС. Структура системы управления (СУ) ГГ БВС состоит из замкнутых информационных уровней, взаимодействие

между которыми должно осуществляться в доменах синхронизма задач, решаемых на каждом уровне¹. В состав СУ должны входить:

- бортовое оборудование, содержащее центральный процессор и получающее оперативную информацию о параметрах управляемого объекта и его рабочей зоны (датчики);
- пультное оборудование, совместно с бортовым оборудованием вырабатывающее управляющие команды на исполнительные устройства ГГ БВС;
- канал связи, соединяющий бортовое и пультное оборудование.

Структурная схема СУ ГГ БВС приведена на рис. 1.

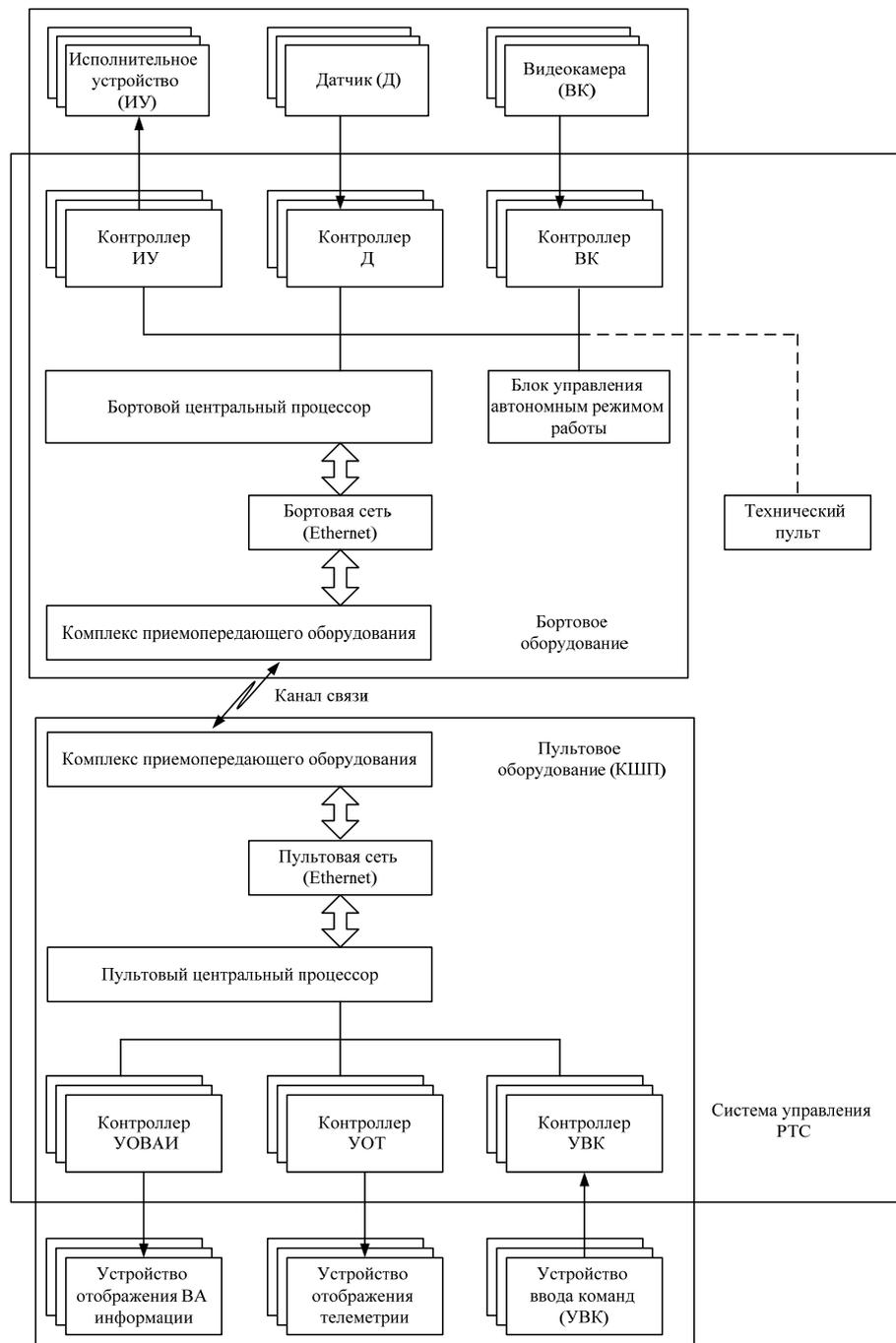


Рис. 1. Структурная схема системы управления гетерогенной группой беспилотных воздушных судов

¹ ГОСТ Р 55895-2013. Техника пожарная. Системы управления робототехнических комплексов для проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения. Общие технические требования. Методы испытаний.

При использовании ГГ БВС связь между членами группы имеет большое значение в управлении и координации. Структура связи определяет, как осуществляется обмен информацией между БВС в группе или между ГГ БВС и оператором. В работе [6] подробно рассматриваются четыре коммуникационные структуры, их преимущества и недостатки, сценарии применения.

Анализ рис. 1 показывает, что канал связи является одним из «узких» мест в функционировании ГГ БВС.

Результаты и обсуждение

По мнению авторов, современный МТМК должен объединять в себе мощный компьютер, сопрягаемый с разнообразным медицинским оборудованием, средства ближней, средней и дальней беспроводной связи, средства видеоконференции и средства IP-вещания. Авторами предлагается в качестве составных элементов подсистемы связи СУ ГГ БВС использовать пикосети Bluetooth с точкой доступа Wi-Fi и последующим применением системы спутниковой связи *VSAT*. Рассмотрим подробнее разработку каждого из составных элементов (блоков) подсистемы мобильной связи.

Блок ближней радиосвязи выполнен по спецификации Bluetooth и реализует физическое соединение, обеспечивая надежный обмен информацией между персональными устройствами на доступной радиочастоте. Радиус действия небольшой – до 100 метров, но низкая потребляемая мощность (менее 0,1 Вт) и высокий «интеллектуальный» потенциал делают модули Bluetooth перспективными для осуществления взаимодействия практически любых электронных устройств [7].

Возможность самоорганизации устройств с модулями Bluetooth в небольшие пикосети, включающие от 7 до 256 абонентов (рис. 2), является основным преимуществом технологии. Все узлы такой сети работают на одной частоте и разделяют общий канал. Главный узел может поддерживать 7 активных клиентских узлов и до 255 пассивных (спящих) узлов (переведенных управляющим узлом в режим пониженного энергопотребления). Несколько пикосетей могут связываться друг с другом через мосты. Объединенные вместе пикосети составляют рассеянную (scatternet) сеть. Поскольку в каждой пикосети имеется свой master, последовательность и фазы переключения их частот не будут совпадать. Если пикосети взаимодействуют друг с другом, это приводит к понижению пропускной способности. Устройство Bluetooth может выступать в качестве клиента в нескольких пикосетях, но главным узлом (master) может быть только в одной пикосети.

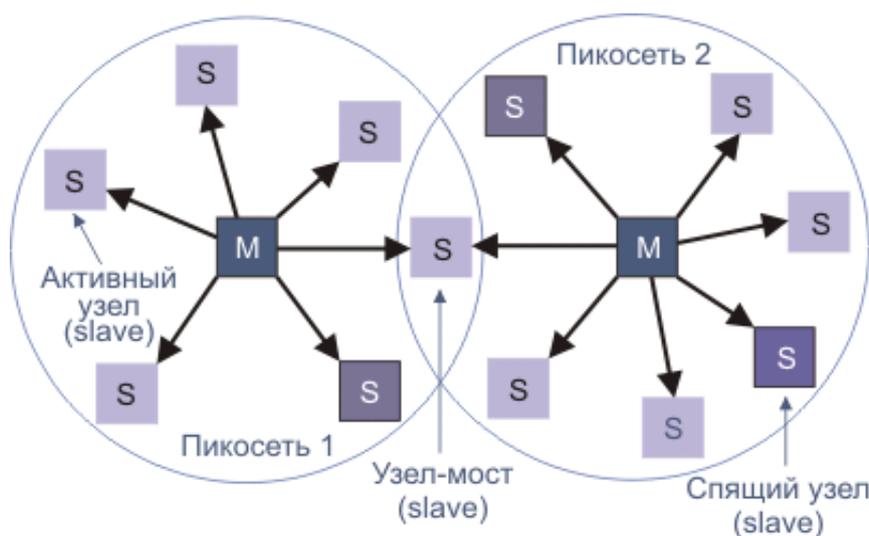


Рис. 2. Структурная схема пикосети Bluetooth

В качестве главного узла (master) в пикосети выступает БВС из гетерогенной группы, а в качестве узлов в пикосети выступают малоподвижные абоненты, например пострадавшие в пределах зоны ЧС. В случае, если радиус действия пикосети превышает номинальную даль-

ность действия передатчика, то для обеспечения связи в удаленных частях пикосети необходимо использовать повторители, выполняющие роль ретрансляторов. Радиointерфейс Bluetooth может работать в нескольких режимах. В активном режиме устройство Bluetooth участвует в работе канала передачи данных. Три остальных режима (ждущий, прослушивания, парковки) характеризуются низким энергопотреблением. Основой модуля BLE 112 (Bluetooth 4,0), определяющей всю идеологию и отличительные особенности, является базовый чипсет Texas Instrument CC2540, представляющий собой однокристалльную сборку SoC – 65 нм/2,4 ГГц. Основные характеристики BLE (Bluetooth с низким энергопотреблением) приведены в табл. 1 [7].

Таблица 1

Параметры Bluetooth low energy (CC2540)

Параметры	Мин.	Тип.	Макс.	Ед.изм
Условия работы				
Диапазон частот	2402		2480	МГц
Пропускная способность	–	1000	24000	МБ/сек
Напряжение питания	2	–	3,6	В
Температура окружающего воздуха	–40	–	+85	°С
Выходная мощность	–20	–	+4	дБм
Прием				
Чувствительность приемника	–	–93	–	дБм
Подавление сигнала соседнего канала, +1 МГц	–	5	–	дБ
Подавление сигнала соседнего канала, –1 МГц	–	5	–	дБ
Подавление сигнала соседнего канала, +2 МГц	–	30	–	дБ
Подавление сигнала соседнего канала, –2 МГц	–	30	–	дБ
Потребление тока				
Потребление тока, прием	–	19,6	–	мА
Потребление тока, передача, +5 дБм	–	31,6	–	мА
Потребление тока, передача, 0 дБм	–	27	–	мА
Потребление тока, «спящий» режим	–	0,4	–	мА

Все необходимые элементы для создания устройств с поддержкой технологии Bluetooth 4.0 находятся на одном кристалле BLE 112.

При разработке структурной схемы блока средней радиосвязи (модуля Wi-Fi) авторами предлагается использовать архитектуру «точка – много точек» [8]. В этом режиме точки доступа обеспечивают связь клиентских компьютеров (рис. 3).

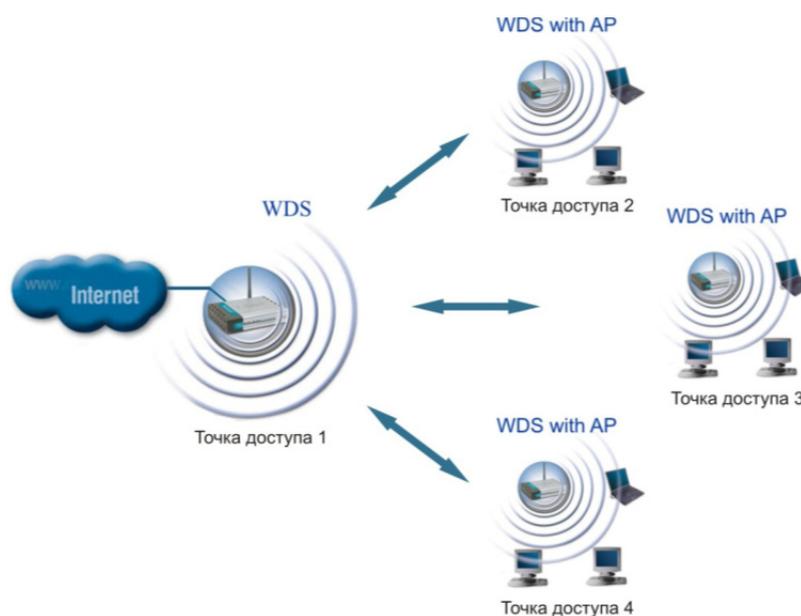


Рис. 3. Структурная схема блока средней радиосвязи

Точку доступа можно рассматривать как беспроводной коммутатор. Клиентские станции не связываются непосредственно одна с другой, а связываются с точкой доступа, и она уже направляет пакеты адресатам.

Термин *WDS* (Wireless Distribution System) расшифровывается как «распределенная беспроводная система». В этом режиме точки доступа соединяются только между собой, образуя мостовое соединение. При этом каждая точка может соединяться с несколькими другими точками. Все точки в этом режиме должны использовать одинаковый канал, поэтому количество точек, участвующих в образовании моста, не должно быть чрезмерно большим.

Термин *WDS with AP* (*WDS with Access Point*) обозначает «распределенная беспроводная система, включая точку доступа», т.е. с помощью этого режима можно организовать не только мостовую связь между точками доступа, но и одновременно подключить клиентские компьютеры. В качестве адресатов выступают главные узлы (masters) пикосетей Bluetooth (см. рис. 2).

Структурная схема блока средней радиосвязи позволяет объединять беспроводные LAN, находящиеся на расстояниях до нескольких километров.

Точка доступа 1 на рис. 3 представляет собой комплект приемопередающего оборудования МТМК (см. рис. 1), обеспечивающего передачу информации с блока беспроводной связи в блок спутниковой связи.

Структура блока дальней радиосвязи (системы спутниковой связи (ССС)) определяется структурой земной станции (ЗС). По критерию стоимости выбираем ЗС типа *VSAT* (*VSAT – Very Small Aperture Terminal*), связанных с одной главной ЗС (*MES – Master Earth Station*). Оборудование *VSAT* оптимизируется под предоставление конкретных услуг, таких как телемедицина и служба чрезвычайных ситуаций [9].

Блок дальней радиосвязи осуществляет прием–передачу данных, аудиосигнала, видеосигнала или их комбинаций в цифровом виде. Терминалы *VSAT* общаются между собой посредством транзита с обработкой через главную ЗС – *MES*. Топология таких сетей является звездообразной. Структурная схема *VSAT* приведена на рис. 4.

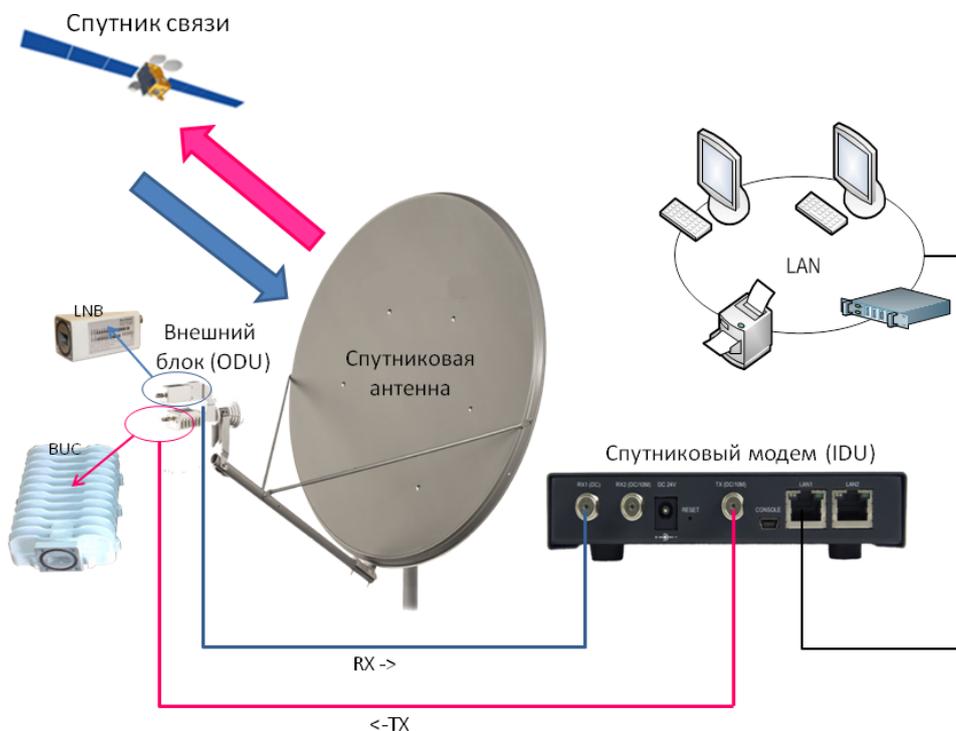


Рис. 4. Структурная схема VSAT

Терминал *VSAT* состоит из трех основных элементов: антенной системы, наружного блока (*Out Door Unit, ODU*), размещаемого непосредственно на антенне, и внутреннего (*In Door Unit, IDU*), устанавливаемого в помещении пользователя. Диаметр антенной системы составляет $1,2 \div 1,8$ м.

Заключение и выводы

По мнению авторов, построение на основе принципа иерархии подсистемы связи мобильного телемедицинского комплекса, оснащенного гетерогенной группой беспилотных воздушных судов и функционирующего в условиях ЧС, позволяет решать ресурсоемкие и сложные задачи в медицине и при ликвидации последствий ЧС.

При оснащении пострадавших в ЧС средствами контроля функционального состояния организма и средствами ближней связи на основе Bluetooth с низким энергопотреблением, объединенными в пикосети с главным узлом (master) в пикосети, расположенным на БВС из гетерогенной группы, появляется возможность своевременного оказания медицинской помощи.

Благодаря средствам радиосвязи средней дальности, которыми оснащены БВС гетерогенной группы, оператор МТМК оперативно реагирует на изменение обстановки в зоне ЧС.

Средства дальней радиосвязи обеспечивают телемедицинские консультации.

Таким образом, для минимизации медицинских последствий ЧС оснащение современного МТМК должно объединять в себе мощный компьютер, сопрягаемый с разнообразным медицинским оборудованием, средства ближней, средней и дальней беспроводной связи, средства видеоконференции и средства IP-вещания.

Список литературы

1. Патент 2694528 РФ. Способ проведения поисково-спасательных работ / Шерстнев В. В., Бодин О. Н., Безбородова О. Е. [и др.] ; № 2018139491 ; заявл. 07.11.2018 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20. 31 с.
2. Ермолов И. Л., Хрипунов С. П. Проблемы группового применения робототехнических комплексов и пути их решения // Экстремальная робототехника. 2018. Т. 1, № 1. С. 279–285.
3. Хрипунов С. П., Васильев С. В., Благодарящев И. В. Методический подход к синтезу интеллектуальной информационно-управляющей системы группового применения робототехнических комплексов военного назначения // Радиотехника, Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 2, т. 15.
4. Буравлев А. И., Русанов И. П. Модель оценки эффективности боевых систем // Военная мысль. 2009, № 5.
5. Texas Instruments: 2.4-GHz Bluetooth low energy System-on-Chip. CC2540F128, CC2540F256, SWRS084. 2010. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2540.pdf>
6. Довгаль В. А., Довгаль Д. В. Анализ систем коммуникационного взаимодействия дронов, выполняющих поисковую миссию в составе группы // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. 4: Естественно-математические и технические науки. 2020. № 4. С. 87–94.
7. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов. 4-е изд. СПб. : Питер, 2010. 944 с.
8. Колубакин В. Что такое VSAT // Телеспутник. 2015. № 6. С. 6–8.

References

1. Patent 2694528 Russian Federation. Method of search and rescue operations. Sherstnev V.V., Bodin O.N., Bezborodova O.E. [et al.]; No. 2018139491; appl. 07.11.2018; publ. 16.07.2019, bull. № 20. (In Russ.)
2. Ermolov I.L., Khripunov S.P. Problems of group application of robotic complexes and ways of their solution. *Ekstremal'naya robototekhnika = Extreme robotics*. 2018;1(1):279–285. (In Russ.)
3. Khripunov S.P., Vasil'ev S.V., Blagodaryashchev I.V. Methodical approach to the synthesis of an intelligent information and control system for the group application of robotic complexes for military purposes. *Radio-tekhnika, Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Radio engineering, Information measuring and control systems*. 2017;15(2). (In Russ.)
4. Buravlev A.I., Rusanov I.P. Model for evaluating the effectiveness of combat systems. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2009;(5). (In Russ.)
5. Texas Instruments: 2.4-GHz Bluetooth low energy System-on-Chip. CC2540F128, CC2540F256, SWRS084. 2010. Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2540.pdf>
6. Dovgal' V.A., Dovgal' D.V. Analysis of communication interaction systems of drones performing a search mission as part of a group. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskije nauki = Bulletin of the Adygea State University. Ser. 4: Natural-mathematical and technical sciences*. 2020;(4):87–94. (In Russ.)
7. Olfier V.G., Olfier N.A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly: uchebnik dlya vuzov = Computer networks. Principles, technologies, protocols : textbook for universities*. 4th ed. Saint Petersburg: Peter, 2010:944. (In Russ.)
8. Kolyubakin V. What is VSAT. *Telesputnik = Telesputnik*. 2015;(6):6–8. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors**Нурлан Баянбай**

старший лектор института автоматизации
и информационных технологий,
Казахский национальный исследовательский
университет имени К. И. Сатпаева
(Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22а)
E-mail: bayanbay_nur@mail.ru

Nurlan Bayanbai

Senior lecturer of the Institute of Automation
and Information Technologies,
K.I. Satpayev Kazakh National Research University
(22a Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

Касымбек Адильбекович Ожикенов

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой робототехники
и технических средств автоматизации,
Казахский национальный исследовательский
университет имени К. И. Сатпаева
(Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22а)
E-mail: k.ozhikenov@satbayev.university

Kassymbek A. Ozhikenov

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of robotics
and technical means of automation,
K.I. Satpayev Kazakh National Research University
(22a Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

Владислав Владимирович Шерстнев

соискатель,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Vladislav V. Sherstnev

Applicant,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Оксана Евгеньевна Безбородова

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой техносферной
безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ot@pnzgu.ru

Oksana E. Bezborodova

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of technosphere safety,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: bodin_o@inbox.ru

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА И УПРАВЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИЕЙ МАНИПУЛЯТОРА, УСТАНОВЛЕННОГО НА БЕСПИЛОТНОМ ВОЗДУШНОМ СУДНЕ

В. В. Шерстнев

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются конструкция и управление конфигурацией манипулятора, установленного на беспилотном воздушном судне и предназначенного для проведения отдельных операций спасательных работ. Целью работы является решение задачи управления конфигурацией манипулятора с учетом его конструкции. *Материалы и методы.* Поставленная задача сводится к решению прямой и обратной задач кинематики. Используются аппарат матриц однородного преобразования, описание обобщенных характеристик конфигурации манипулятора, представленных параметрами Денавита – Хартенберга. *Результаты.* Решена прямая задача кинематики для рассматриваемого манипулятора, в том числе методом рекурсивного алгоритма. Предложен алгоритм управления конфигурацией манипулятора посредством решения обратной задачи кинематики. *Выводы.* Методы, применяемые для решения задачи управления конфигурацией манипулятора, позволяют использовать манипулятор предложенной конструкции, установленный на беспилотном воздушном судне, для проведения операций спасательных работ. Предложенный алгоритм управления конфигурацией манипулятора, заключающийся в определении обобщенных характеристик конечного эффектора, последующего определения обобщенных характеристик для его родительских сегментов, задания ориентации и положения в пространстве промежуточному эффектору (в частности, звену поворота предплечья манипулятора) для родительских сегментов с дальнейшим заданием ориентации и положения его дочерним сегментам (включая рабочий конец манипулятора), позволяет выстроить звенья манипулятора в оптимальной конфигурации, учитывая при этом условия проведения той или иной операции спасательных работ (таких как наличие препятствий в рабочей зоне, ориентация и положение объекта, над которым выполняется операция).

Ключевые слова: манипулятор, беспилотное воздушное судно, кинематическая схема, конфигурация манипулятора, прямая задача кинематики, параметры Денавита – Хартенберга, матрицы однородного преобразования, обратная задача кинематики

Для цитирования: Шерстнев В. В. Кинематическая схема и управление конфигурацией манипулятора, установленного на беспилотном воздушном судне // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 100–110. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-12

KINEMATIC SCHEME AND MANIPULATOR CONFIGURATION CONTROL, INSTALLED ON AN UNMANNED AIRCRAFT

V.V. Sherstnev

Penza State University, Penza, Russia
iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is the design and configuration control of a manipulator mounted on an unmanned aircraft and designed to carry out individual rescue operations. The purpose of the work is to solve the problem of manipulator configuration management taking into account its design. *Materials and methods.* The task is reduced to solving direct and inverse kinematics problems. The apparatus of homogeneous transformation matrices and the description of generalized characteristics of the manipulator configuration represented by Denavit-Hartenberg parameters are used. *Results.* The direct kinematics problem for the manipulator under consideration is solved, including by the method of a recursive algorithm. An algorithm for manipulator configuration control by solving the inverse kinematics problem is proposed. *Conclusions.* The methods used to solve the problem of manipulator configuration management allow using a manipulator of the proposed design mounted on an unmanned aircraft to carry out rescue operations. The proposed algorithm for manipulator configuration control, which consists in determining the generalized characteristics of the final effector, then determining the generalized characteristics for its parent segments, setting the

orientation and position in space of the intermediate effector (in particular, the arm rotation segment of the manipulator) and its parent segments with further setting the orientation and position of its child segments (including the working end of the manipulator), allows you to build the manipulator segments in an optimal configuration, taking into account the conditions of a rescue operation (such as the presence of obstacles in the work area, the orientation and position of the object over which the operation is performed).

Keywords: manipulator, unmanned aircraft, kinematic scheme, manipulator configuration, direct kinematics problem, Denavit – Hartenberg parameters, homogeneous transformation matrices, inverse kinematics problem

For citation: Sherstnev V.V. Kinematic scheme and manipulator configuration control, installed on an unmanned aircraft. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):100–110. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-12

Постановка проблемы

Проведение поисково-спасательных работ (ПСР) в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) связано с риском для личного состава поисково-спасательной команды. Применение роботов при локализации и ликвидации последствий ЧС позволяет значительно снизить опасность для спасателей. Данные задачи выполняются благодаря наличию в составе команды спасателей гетерогенной группы (ГГ) беспилотных воздушных судов (БВС) [1, 2], в состав которой входят БВС экологического назначения (выполняет задачи по минимизации воздействия поражающих факторов (ПФ) ЧС, проводит анализ окружающей среды на предмет наличия опасных веществ) и БВС медицинского назначения (оказывает пострадавшим медицинскую помощь, осуществляет маркировку пострадавших по результатам проведенной медицинской сортировки, при необходимости оснащает пострадавших аптечкой).

Данные БВС для выполнения возложенных на них задач оснащены механическим манипулятором (ММ). В работе [3] предложен способ проведения спасательных работ, а именно, выполнение ряда операций по минимизации последствий ЧС и оказанию медицинской помощи пострадавшим с использованием таких БВС.

Материалы и методы

В рамках проведения ПСР БВС оснащается манипулятором (см. рис. 1,а), а также съемной кассетой, ячейки которой укомплектованы (в соответствии с возлагаемыми на БВС задачами) оборудованием. Рабочий конец манипулятора устроен таким образом, что предусматривается возможность смены подсоединяемого к нему инструмента.

Грузовой отсек находится под днищем БВС (см. рис. 1,б).

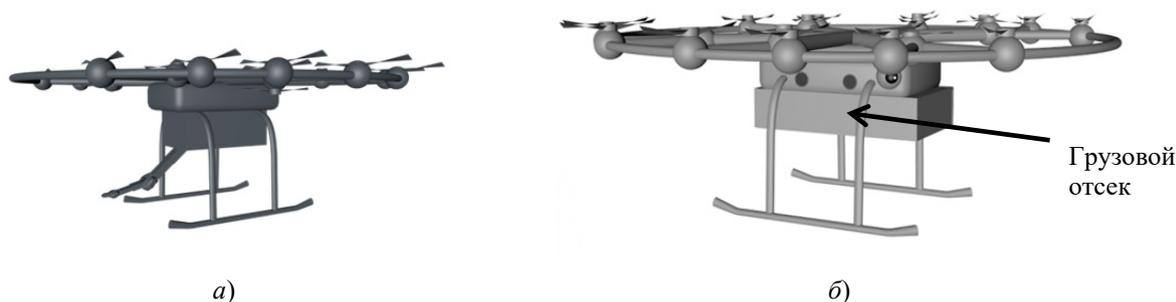
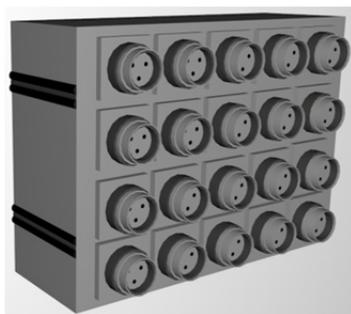


Рис. 1. Беспилотное воздушное судно с манипулятором:
а – общий вид беспилотного воздушного судна с манипулятором в рабочем положении;
б – расположение грузового отсека беспилотного воздушного судна

Такое расположение грузового отсека обусловлено возможностью расположения манипулятора непосредственно над точкой проведения той или иной операции.

Кассета и манипулятор (в походном положении) размещаются внутри грузового отсека (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Грузовой отсек беспилотного воздушного судна:
а – кассета с ячейками для специального оборудования;
б – манипулятор в походном положении

Операции, проводимые в рамках ПСР с помощью ММ, приведены на рис. 3.



Рис. 3. Операции, выполняемые с помощью механического манипулятора

Таким образом, посредством установленного оборудования представляется возможным выполнение всех возлагаемых на данные суда задач (рис. 3). Кроме того, предусматривается возможность (в случае необходимости) съема подсоединяемого к рабочему концу манипулятора оборудования (после снятия оператором БВС соответствующей блокировки) и применения данного оборудования вручную личным составом поисково-спасательной команды или лицами, оказывающими помощь пострадавшему.

Результаты и обсуждение

Конструкция предлагаемого манипулятора обладает рядом особенностей, обуславливающих его применение на БВС. Манипулятор включает следующие звенья (рис. 4): звено поворота плеча (1), внешний (2) и внутренний выдвигной (3) сегменты плеча, звено поворота предплечья (4), внешний (5) и внутренний выдвигной (6) сегменты предплечья, звено поворота кисти (7), кисть (8) и звено поворота инструмента (9).

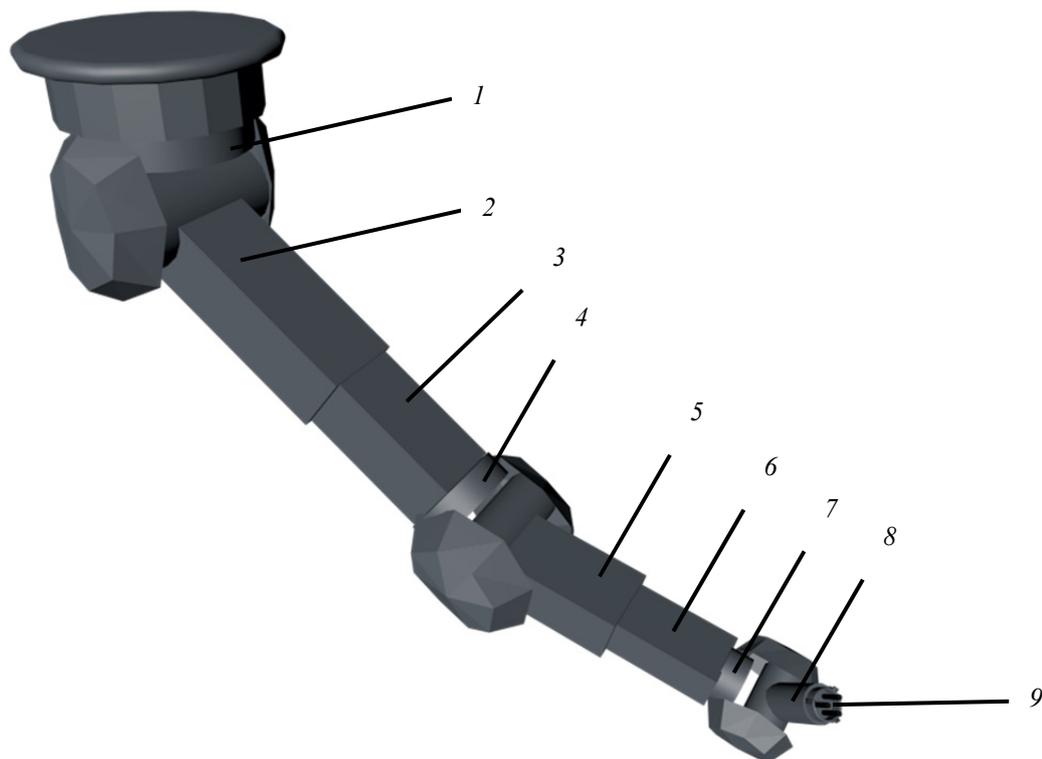


Рис. 4. Конструкция механического манипулятора

Семь кинематических пар манипулятора являются вращательными, а две (пары «внешний и внутренний выдвижной сегменты» плеча и предплечья) – поступательными. Такой выбор кинематической схемы обусловлен необходимостью прироста рабочей зоны манипулятора.

Манипулятор может находиться в одном из двух положений – походном и рабочем. В походное положение манипулятор переводится перед полетом БВС; данному положению соответствует начальная, или нулевая, конфигурация манипулятора (рис. 5). При этом внутренние выдвижные сегменты плеча и предплечья находятся внутри соответствующих внешних сегментов; звенья манипулятора, начиная с плеча и заканчивая звеном поворота кисти, выстроены в прямую линию относительно друг друга.

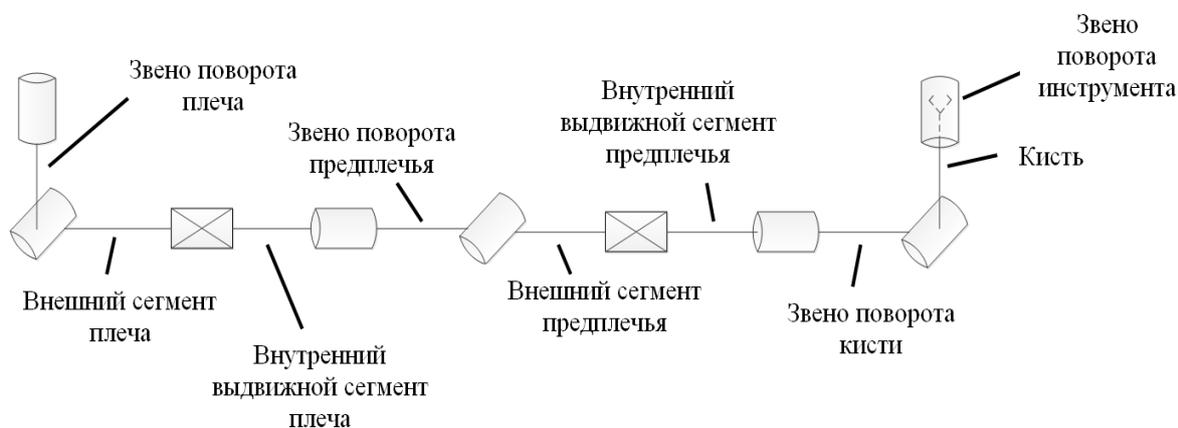


Рис. 5. Схема расположения звеньев манипулятора

В общем, решение задач управления манипуляторами сводится к решению прямой и обратной, или инверсной, задач кинематики. Звенья манипулятора верхнего уровня являются родительскими звеньями, или сегментами, нижнего – дочерними; так, схват манипулятора является дочерним сегментом по отношению ко всем звеньям манипулятора.

Прямая кинематика заключается в передаче воздействия по иерархической цепочке, от родительских сегментов к дочерним. Так, применительно к манипулятору, рассматриваемому в данной работе, звено поворота плеча, подсоединенное через неподвижное звено к платформе, находящейся внутри грузового отсека БВС, задает ориентацию звену плеча, которое впоследствии за счет электропривода поступательного движения задает смещение своему подвижному сегменту и т.д. Таким образом, суть прямой задачи кинематики сводится к определению пространственного положения схвата манипулятора на основании обобщенных координат звеньев механического манипулятора.

Решение прямой задачи кинематики сводится к выполнению следующих этапов [4]:

- 1) привязка систем координат к сегментам манипулятора;
- 2) определение параметров Денавита – Хартенберга каждого сегмента;
- 3) формирование матриц преобразования;
- 4) вычисление ориентации рабочего конца манипулятора по итоговой матрице вращения;
- 5) вычисление положения рабочего конца манипулятора по итоговой матрице линейного смещения.

Далее шаги 1–3 выполнены для нулевой конфигурации манипулятора (рис. 3).

Девять звеньев манипулятора нумеруются от нуля до восьми (нулевое, т.е. поворотное звено соответствует «земле»: такой принцип нумерации наиболее часто встречается в русскоязычной литературе). Привязка систем координат к звеньям основывается на том принципе, что ось z_i совпадает с осью вращения (в случае с вращательной кинематической парой) i -го звена или с направлением движения выдвигного сегмента (что касается поступательных кинематических пар). Направление оси x_i задается таким образом, чтобы она была перпендикулярной к оси z_{i-1} и пересекала ее. Ось y_i выбирается так, чтобы система координат $ox_iy_iz_i$ была правой, т.е., чтобы из конца третьего орта z_i поворот первого орта x_i ко второму орту y_i был виден происходящим против хода часовой стрелки. Схема привязки систем координат к сегментам манипулятора (к слову, находящегося в нулевой конфигурации) приведена на рис. 6.

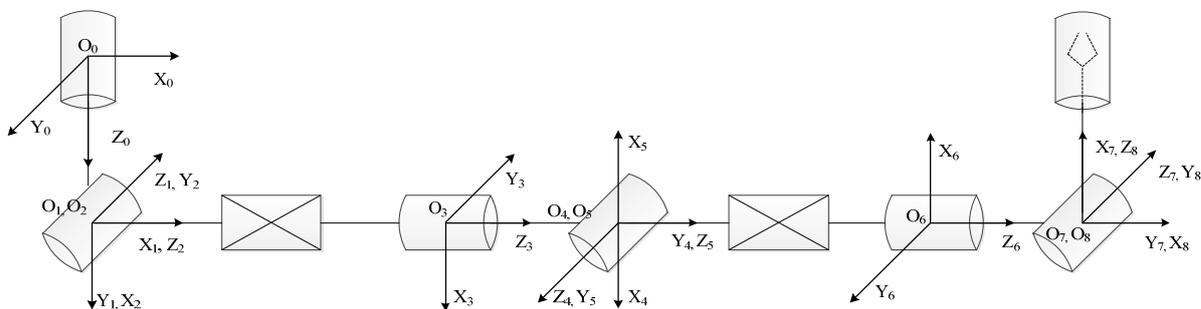


Рис. 6. Схема привязки систем координат к сегментам манипулятора

Параметры Денавита – Хартенберга включают [5, 6]:

- 1) a_i – линейное смещение, представляющее собой кратчайшее расстояние по оси x_i между осями z_{i-1} и z_i ;
- 2) α_i – угловое смещение, представляющее собой угол вокруг оси x_i между осями z_{i-1} и z_i ;
- 3) d_i – расстояние по оси z_{i-1} от оси x_{i-1} до оси x_i ;
- 4) θ_i – угол вокруг оси z_{i-1} между осями x_{i-1} и x_i .

Параметры a_i и α_i всегда являются постоянными: они определяются конструкцией того или иного манипулятора. В свою очередь, для вращательных кинематических пар параметр d_i будет постоянным, а θ_i – изменяемым; для поступательных пар – наоборот.

В табл. 1 приведены параметры Денавита – Хартенберга (α_i , d_i , θ_i), определенные для данного манипулятора; линейное смещение a_i для каждого звена манипулятора равно нулю. Конфигурация манипулятора зависит от значений изменяемых обобщенных координат.

нат (в таблице они соответствующим образом обозначены). Так, значения d_1, d_4, d_7 являются неизменяемыми и зависят от конструкции манипулятора; значения обобщенных координат d_i для третьего и шестого звеньев (выдвижных сегментов плеча и предплечья) складываются из слагаемых (соответственно) d_i и L_i , при этом d_i является параметром, характеризующим линейное смещение внутреннего выдвижного сегмента относительного соответствующего внешнего, а L_i является неизменяемым параметром, зависящим от длины данных звеньев.

Таблица 1

Параметры Денавита – Хартенберга

Звено	α_i	d_i	θ_i
1	$\frac{\pi}{2}$	d_1	$\theta_1 \neq \text{const} (0)$
2	$\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_2 + \frac{\pi}{2} \neq \text{const} (\frac{\pi}{2})$
3	0	$d_3 + L_2 \neq \text{const}$	0
4	$\frac{\pi}{2}$	d_4	$\theta_4 \neq \text{const} (0)$
5	$\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_5 + \pi \neq \text{const} (\pi)$
6	0	$d_6 + L_5 \neq \text{const}$	0
7	$\frac{\pi}{2}$	d_7	$\theta_7 \neq \text{const} (0)$
8	$\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_8 + \frac{\pi}{2} \neq \text{const} (\frac{\pi}{2})$

Для изменяемых значений θ_i в скобках указаны значения, соответствующие нулевой конфигурации манипулятора (рис. 6).

Матрицы преобразования формируются для каждого звена и на основании этого рассчитывается итоговая матрица однородного преобразования. В составе матриц преобразования учитываются матрицы вращения и матрицы линейного смещения.

Так, матрица однородного преобразования T_n^0 , связывающая две системы координат ($ox_0y_0z_0$ и $ox_ny_nz_n$) и содержащая матрицу вращения R_n^0 и матрицу линейного смещения p_n^0 , имеет вид

$$T_n^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{1}$$

Используя параметры Денавита – Хартенберга, можно построить соответствующие матрицы перехода [7]:

$$A_i = A_{z,\theta_i} A_{z,d_i} A_{x,\alpha_i} A_{z,\alpha_i} = \begin{bmatrix} R_{z,\theta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & p_{d_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & p_{\alpha_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{x,\alpha_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Далее по тексту матрицей A_j^i обозначается матрица перехода от i -й системы координат к j -й системе координат:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos\left(\theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & \sin\left(\theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ \sin\left(\theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & -\cos\left(\theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 + L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5 + \pi) & 0 & \sin(\theta_5 + \pi) & 0 \\ \sin(\theta_5 + \pi) & 0 & -\cos(\theta_5 + \pi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_6^5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 + L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_7^6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_7 & 0 & \sin \theta_7 & 0 \\ \sin \theta_7 & 0 & -\cos \theta_7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_8^7 = \begin{bmatrix} \cos\left(\theta_8 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & \sin\left(\theta_8 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ \sin\left(\theta_8 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & -\cos\left(\theta_8 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для решения прямой задачи кинематики, а именно: для определения ориентации и положения системы координат, связанной с рабочим концом манипулятора, относительно базовой системы координат требуется найти итоговую матрицу однородного преобразования T_8^0 посредством последовательного перемножения полученных матриц перехода A_j^i :

$$T_8^0 = A_1^0 A_2^1 \dots A_8^7.$$

Для краткости записи принимаются следующие обозначения:

$$\sin \theta_i = s_i, \quad \cos \theta_i = c_i, \quad \sin(\theta_i + \gamma) = s_{i,\gamma}, \quad \cos(\theta_i + \gamma) = c_{i,\gamma}, \quad d_i + l = d_{i,l}.$$

Представляя итоговую матрицу (1) как

$$T_8^0 = \begin{bmatrix} x_{8x} & y_{8x} & z_{8x} & p_x \\ x_{8y} & y_{8y} & z_{8y} & p_y \\ x_{8z} & y_{8z} & z_{8z} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ориентация рабочего конца манипулятора определяется через

$$x_{8x} = \left(\left(\left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 + s_1 s_4 \right) c_{5,\pi} + c_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} s_{5,\pi} \right) c_7 + \left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} s_4 - s_1 c_4 \right) s_7 \right) c_{8,\frac{\pi}{2}} + \left(\left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 + s_1 s_4 \right) s_{5,\pi} - c_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) s_{8,\frac{\pi}{2}};$$

$$x_{8y} = \left(\left(\left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 - c_1 s_4 \right) c_{5,\pi} + s_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} s_{5,\pi} \right) c_7 + \left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} s_4 + c_1 c_4 \right) s_7 \right) c_{8,\frac{\pi}{2}} + \left(\left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 - c_1 s_4 \right) s_{5,\pi} - s_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) s_{8,\frac{\pi}{2}};$$

$$x_{8z} = \left(\left(s_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 c_{5,\pi} - c_{2,\frac{\pi}{2}} s_{5,\pi} \right) c_7 + s_{2,\frac{\pi}{2}} s_4 s_7 \right) c_{8,\frac{\pi}{2}} + \left(s_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 s_{5,\pi} + c_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) s_{8,\frac{\pi}{2}};$$

$$y_{8x} = \left(\left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 + s_1 s_4 \right) c_{5,\pi} + c_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} s_{5,\pi} \right) s_7 - \left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} s_4 - s_1 c_4 \right) c_7;$$

$$y_{8y} = \left(\left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 - c_1 s_4 \right) c_{5,\pi} + s_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} s_{5,\pi} \right) s_7 - \left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} s_4 + c_1 c_4 \right) c_7;$$

$$y_{8z} = \left(s_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 c_{5,\pi} - c_{2,\frac{\pi}{2}} s_{5,\pi} \right) s_7 - s_{2,\frac{\pi}{2}} s_4 c_7;$$

$$z_{8x} = \left(\left(\left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 + s_1 s_4 \right) c_{5,\pi} + c_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} s_{5,\pi} \right) c_7 + \left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} s_4 - s_1 c_4 \right) s_7 \right) s_{8,\frac{\pi}{2}} - \left(\left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 + s_1 s_4 \right) s_{5,\pi} - c_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) c_{8,\frac{\pi}{2}};$$

$$z_{8y} = s_7 \left(\left(\left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 - c_1 s_4 \right) c_{5,\pi} + s_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} s_{5,\pi} \right) c_7 + \left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} s_4 + c_1 c_4 \right) s_7 \right) s_{8,\frac{\pi}{2}} - \left(\left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 - c_1 s_4 \right) s_{5,\pi} - s_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) c_{8,\frac{\pi}{2}};$$

$$z_{8z} = \left(\left(s_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 c_{5,\pi} - c_{2,\frac{\pi}{2}} s_{5,\pi} \right) c_7 + s_{2,\frac{\pi}{2}} s_4 s_7 \right) s_{8,\frac{\pi}{2}} - \left(s_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 s_{5,\pi} + c_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) c_{8,\frac{\pi}{2}};$$

а вектор линейного смещения p_8^0 , исходя из выражений (1) и (2), определяется значениями p_x, p_y, p_z :

$$\begin{aligned}
 p_x &= \left(\left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 + s_1 s_4 \right) s_{5,\pi} - c_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) d_7 + \left(\left(c_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 + s_1 s_4 \right) s_{5,\pi} - c_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) d_{6,L_5} + c_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} d_4 + c_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} d_{3,L_2}; \\
 p_y &= \left(\left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 - c_1 s_4 \right) s_{5,\pi} - s_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) d_7 + \left(\left(s_1 c_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 - c_1 s_4 \right) s_{5,\pi} - s_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) d_{6,L_5} + s_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} d_4 + s_1 s_{2,\frac{\pi}{2}} d_{3,L_2}; \\
 p_z &= \left(s_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 s_{5,\pi} + c_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) d_7 + \left(s_{2,\frac{\pi}{2}} c_4 s_{5,\pi} + c_{2,\frac{\pi}{2}} c_{5,\pi} \right) d_{6,L_5} - c_{2,\frac{\pi}{2}} d_4 - c_{2,\frac{\pi}{2}} d_{3,L_2} + d_1.
 \end{aligned}$$

Данные выражения являются решением прямой задачи кинематики, они наиболее явно показывают ориентацию и положение схвата манипулятора относительно базовой системы координат, однако такая запись является слишком громоздкой. Для решения прямой задачи кинематики удобно пользоваться рекурсивным алгоритмом, который выглядит следующим образом.

Матрица положения i -го звена манипулятора в абсолютной системе координат описывается в работе [7] как

$$T_i = \begin{pmatrix} x_i & y_i & z_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, поскольку основание манипулятора описывается единичной матрицей (поворот на нулевой угол) и нулевым смещением

$$T_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

то $x_0 = (1, 0, 0)^T$, $y_0 = (0, 1, 0)^T$, $z_0 = (0, 0, 1)^T$, $p_0 = (0, 0, 0)^T$.

В свою очередь i -е звено манипулятора определяется следующими x_i , y_i , z_i , p_i :

$$x_1 = c_1 x_0 + s_1 y_0, \quad y_1 = z_0, \quad z_1 = s_1 x_0 - c_1 y_0, \quad p_1 = d_1 z_0;$$

$$x_2 = c_{2,\frac{\pi}{2}} x_1 + s_{2,\frac{\pi}{2}} y_1, \quad y_2 = z_1, \quad z_2 = s_{2,\frac{\pi}{2}} x_1 - c_{2,\frac{\pi}{2}} y_1, \quad p_2 = p_1;$$

$$x_3 = x_2, \quad y_3 = y_2, \quad z_3 = z_2, \quad p_3 = d_{3,L_2} z_2 + p_2;$$

$$x_4 = c_4 x_3 + s_4 y_3, \quad y_4 = z_3, \quad z_4 = s_4 x_3 - c_4 y_3, \quad p_4 = d_4 z_3 + p_3;$$

$$x_5 = c_{5,\pi} x_4 + s_{5,\pi} y_4, \quad y_5 = z_4, \quad z_5 = s_{5,\pi} x_4 - c_{5,\pi} y_4, \quad p_5 = p_4;$$

$$x_6 = x_5, \quad y_6 = y_5, \quad z_6 = z_5, \quad p_6 = d_{6,L_5} z_5 + p_5;$$

$$x_7 = c_7 x_6 + s_7 y_6, \quad y_7 = z_6, \quad z_7 = s_7 x_6 - c_7 y_6, \quad p_7 = d_7 z_6 + p_6.$$

Решением прямой задачи кинематики для рабочего конца манипулятора является

$$x_8 = c_{8,\frac{\pi}{2}} x_7 + s_{8,\frac{\pi}{2}} y_7, \quad y_8 = z_7, \quad z_8 = s_{8,\frac{\pi}{2}} x_7 - c_{8,\frac{\pi}{2}} y_7, \quad p_8 = p_7.$$

Таким образом, используя приведенное решение прямой задачи кинематики, можно вычислить ориентацию и положение инструмента, подсоединенного к рабочему концу манипулятора.

Обратная задача кинематики заключается в определении обобщенных координат звеньев манипулятора на основании пространственного положения его схвата. Пример алгоритма управления конфигурацией рассматриваемого манипулятора приведен на рис. 7.



Рис. 7. Алгоритм управления механическим манипулятором

Рабочий конец манипулятора является конечным эффектором: исходя из характеристик его пространственного положения определяется требуемая конфигурация манипулятора, в том числе положение и ориентация промежуточного эффектора – звена поворота предплечья. Затем на основании определенных обобщенных координат промежуточному эффектору задаются требуемые ориентация и положение в пространстве (путем придания требуемой конфигурации его родительским сегментам), после чего – к точке проведения операции направляется рабочий конец манипулятора. В целом, не существует общего метода решения обратной задачи кинематики; в зависимости от поставленной задачи возможно применение таких подходов, как, например, метод обратных преобразований, итерационный метод, тригонометрический подход [7]; кроме того, одному и тому же положению рабочего конца манипулятора может соответствовать бесконечное множество решений. Предполагается непосредственное управление оператором конфигурацией манипулятора исходя из конкретных условий выполнения задачи (наличием препятствий в рабочей зоне, ориентацией и положением объекта, над которым выполняется та или иная операция) [8].

Заключение и выводы

В статье представлено решение прямой задачи кинематики для ММ, в том числе методом рекурсивного алгоритма. Предложен алгоритм управления конфигурацией манипулятора использующий решение обратной задачи кинематики, который можно применять при наличии препятствий на пути движения рабочего конца манипулятора: первоочередное задание ориентации и положения промежуточному эффектору позволяет расположить звенья манипулятора в пространстве, избегая столкновения с препятствием.

Список литературы

1. Патент 2694528 С₁ РФ. Способ проведения поисково-спасательных работ / В. В. Шерстнев, О. Н. Бодин, О. Е. Безбородова, Ф. К. Рахматулло, А. И. Герасимов ; № 2018139491 ; заявл. 07.11.2018 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20.
2. Воробьев Ю. Л. Гражданская защита : энцикл. словарь / под общей ред. С. К. Шойгу. М. : ДЭКС-ПРЕСС, 2005. 568 с.

3. Патент 2762052 С₁ РФ. Способ проведения спасательных работ и беспилотное воздушное судно для осуществления способа / В. В. Шерстнев, О. Е. Безбородова, Д. С. Белик, О. Н. Бодин, А. Н. Спиркин, Г. К. Бердибаева ; № 2762052 ; заявл. 30.12.2020 ; опубл. 15.12.2021, Бюл. № 35. С. 23.
4. Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А., Методы управления робототехническими приложениями. СПб. : Университет ИТМО, 2016. 108 с.
5. Параметры Денавита – Хартенберга. URL: [https://ru.abcdef.wiki/wiki/Denavit %E2 %80 %93Hartenberg_parameters](https://ru.abcdef.wiki/wiki/Denavit_%E2%80%93Hartenberg_parameters) (дата обращения: 14.12.2021).
6. Представление Денавита – Хартенберга. URL: https://studopedia.su/3_47738_predstavlenie-denavita--hartenberga.html (дата обращения: 14.12.2021).
7. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
8. Шерстнев В. В. Обеспечение безопасности полета гетерогенной группы беспилотных воздушных судов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 110–118. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-13

References

1. Patent 2694528 S1 Russian Federation. Method of search and rescue operations. V.V. Sherstnev, O.N. Bodin, O.E. Bezborodova, F.K. Rakhmatullof, A.I. Gerasimov; No. 2018139491; appl. 07.11.2018; publ. 16.07.2019, bull. № 20. (In Russ.)
2. Vorob'ev Yu.L. *Grazhdanskaya zashchita: entsikl. slovar'* = *Civil protection : an encyclopedic dictionary*. Moscow: DEKS-PRESS, 2005:568. (In Russ.)
3. Patent 2762052 S1 Russian Federation. Method of rescue operations and unmanned aircraft for the implementation of the method. V.V. Sherstnev, O.E. Bezborodova, D.S. Belik, O.N. Bodin, A.N. Spirkin, G.K. Berdibaeva; No. 2762052; appl. 30.12.2020; publ. 15.12.2021, bull. № 35. (In Russ.)
4. Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A., *Metody upravleniya robototekhnicheskimi prilozheniyami = Methods of control of robotic applications*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2016:108. (In Russ.)
5. Denavit–Hartenberg parameters. (In Russ.). Available at: [https://ru.abcdef.wiki/wiki/Denavit %E2 %80 %93Hartenberg_parameters](https://ru.abcdef.wiki/wiki/Denavit_%E2%80%93Hartenberg_parameters) (accessed 14.12.2021).
6. Denavit–Hartenberg representation. (In Russ.). Available at: https://studopedia.su/3_47738_predstavlenie-denavita--hartenberga.html (accessed 14.12.2021).
7. Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami = Fundamentals of manipulative robot control*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2004:480. (In Russ.)
8. Sherstnev V.V. Ensuring flight safety of a heterogeneous group of unmanned aircraft. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2021;(3):110–118. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-13

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Вадимович Шерстнев

соискатель,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru, тел. (8412)368221

Vladislav V. Sherstnev

Applicant,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021